

VALORIZAÇÃO DOS REJEITOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO PARA USO EM BETÃO – ESTUDO DE RESISTÊNCIAS E DURABILIDADE

CÁTIA MELISSA CARVALHO DA SILVA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Orientador: Professora Doutora Maria Joana Álvares Ribeiro de
Sousa Coutinho

JANEIRO DE 2020

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2019/2020

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2019/2020 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2020*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais,

“A tarefa não é ver aquilo que ninguém viu, mas pensar no que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo o mundo vê.”
Artur Schopenhauer

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta dissertação encerra um ciclo, que considero um dos mais importantes da minha vida, período que exigiu muito esforço e dedicação da minha parte. Desta forma, este desfecho não seria possível, sem demonstrar a minha gratidão a todos os que me incentivaram e ajudaram.

Quero agradecer em primeiro lugar, à minha orientadora, a Professora Joana de Sousa Coutinho, pela confiança e oportunidade em expandir os meus conhecimentos, assim como pela sua disponibilidade, acompanhamento, aconselhamento e paciência no desenvolver deste trabalho final. Os seus conselhos e sensibilidade foram imprescindíveis neste percurso.

A todos os técnicos do LEMC, que foram imprescindíveis para a realização deste trabalho. Ao Gil, Manuel e Dora por toda a disponibilidade, simpatia e auxílio dedicado durante a realização dos ensaios experimentais e eventuais dúvidas sempre esclarecidas. À Eng^a. Patrícia Pereira pela disponibilidade e ajuda na fase final. E a todos os outros, Sr. Fernando, Paulo, Paula e D. Júlia. que me ajudaram e me receberam com a melhor simpatia mal cruzava as portas do laboratório.

Ao LABEST, principalmente à Eng^a. Paula, que me acompanhou, ajudou e esclareceu no decorrer de alguns ensaios.

À empresa de Resíduos de Construção e Demolição SA, pelo fornecimento da amostra.

Aos meus queridos Pais e irmã, que são o pilar da minha vida, pela força, incentivo, confiança e pelos conselhos dados no decorrer deste longo percurso. Obrigado pelo amor verdadeiro, dedicação e pelo esforço que fizeram para que eu pudesse concluir um dos meus maiores objetivos, formar-me como Engenheira.

Aos meus Avós, Dorinda e Rui, sempre presentes e preocupados com o meu bem-estar.

Ao meu namorado Miguel, que me acompanha há 8 anos sempre com carinho, amizade, afeto e respeito. O teu amor e a confiança que depositas em mim foram indispensáveis para o término desta etapa.

Ao meu amigo de longa data Ricardo Jorge, que tive a sorte dos nossos caminhos se cruzarem quando ainda eramos uns miúdos. O meu sincero obrigado por toda a amizade, paciência nos momentos menos bons e companhia, principalmente nas noites que tinha que trabalhar, mas mesmo assim mantinhas-te a meu lado, para nunca me deixares só.

À pessoa mais especial que a FEUP me presenteou, Francisca Futuro, obrigada por esta amizade inesperada, por seres tão presente, alegre e sincera. Tornaste o meu percurso académico muito melhor, graças às longas tardes e noites animadas de estudo, conversas, saídas, companhia, persistência e forma incrível e sensível de veres a vida. À minha amiga Sónia Soares, que desde o meu primeiro dia na faculdade esteve lá para mim, pronta a ajudar, aconselhando-me e auxiliando-me em todas as dúvidas e escolhas que tinha que tomar e, que ao longo de todo o meu percurso guardou para mim os seus primorosos apontamentos. Foi graças a ti que escolhi a especialização em Materiais e Processos de Construção e agradeço-te imenso por me influenciares nesta decisão.

Um muito Obrigada a todos!

RESUMO

Em tempos anteriores, os recursos naturais eram considerados por muitos como inesgotáveis e, com o decorrer dos anos, é notório, que esses recursos têm sofrido cada vez mais excessivas explorações, levando em alguns casos, à sua escassez. Esta situação tem atingido todos os setores, principalmente o da construção civil, uma vez que se trata de um dos setores da indústria de maior consumo de matérias primas e produção de resíduos.

A produção de materiais de construção contribui para as alterações climáticas causadas pelos gases com efeito estufa, sobretudo devido à libertação de grandes quantidades de CO₂ na sua produção. O cimento Portland é um dos grandes exemplos, mais propriamente na produção do seu principal constituinte, o clínquer. Segundo a World Resources Institute, a produção de cimento Portland é responsável por 5% das emissões globais de CO₂ e 3,8% do consumo global de energia.

A presente dissertação tem como objetivo o estudo do material rejeitado no processamento de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) com vista à aplicação em betão armado. Segundo a normalização, apenas podem ser utilizados agregados grossos reciclados em betão e, os finos resultantes são muitas vezes conduzidos para aterro por não terem aplicabilidade. O material fino rejeitado foi então introduzido por duas formas em argamassas (areia e adição), que foram estudadas em termos de resistência e durabilidade, no sentido de se prever o seu comportamento em betão armado.

Foram então produzidas argamassas de controlo com areia normalizada CEN e cimento Portland (CEM I 42,5 R) assim como, argamassas equivalentes com substituição de 100% de areia CEN por agregado fino de RCD (com a mesma granulometria) (CDWs), argamassas com substituição de 5% (em volume) do cimento Portland por agregado fino de RCD previamente moído (adição designada por CDWa) e ainda argamassas com ambas as substituições CDWs+5CDWa.

Desta forma, foram estudadas propriedades de resistência mecânica e durabilidade, nomeadamente carbonatação, resistência à penetração de cloretos, resistividade, resistência à reação álcalis-sílica, resistência ao ataque externo por sulfatos e absorção de água por capilaridade. Os trabalhos de índole intensamente laboratorial contaram com o apoio do LEMC e ainda, do LABEST.

Relativamente à argamassa de CDWs, a perda de resistência não foi muito significativa apresentando melhorias para a capilaridade e reação álcalis-sílica. Para a argamassa de 5CDWa as perdas de resistência foram um pouco maiores, os resultados para as resistividades e álcalis-sílica foram aceitáveis, porém, foram inesperados pela negativa para a absorção de água por capilaridade contrariando estudos anteriores. A argamassa de CDWs+5CDWa apresentou de um modo geral pior comportamento, tendo-se verificado um efeito sinérgico negativo entre as duas substituições, exceto no que concerne a absorção por capilaridade e para as expansões álcalis-sílica onde se obtiveram desempenhos positivos.

Com este estudo, foi possível concluir que a argamassa de CDWs poderá ser usada como substituição de 100% da areia CEN em certas condições, contribuindo assim para a economia circular e, consequentemente para a sustentabilidade na construção.

Em termos de normalização para aplicação em argamassas e betões, será importante e à semelhança do que foi internacionalmente levado a cabo para o agregado grosso, trabalhar no sentido de impor requisitos de qualidade e taxas máximas de substituição para a areia de resíduos de construção e demolição. Assim, a utilização de areia de resíduos de construção e demolição será sem dúvida uma contribuição para a estratégia do “Resíduo Zero” e para a Economia Circular na Construção.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos de construção e demolição, durabilidade, argamassa, agregado reciclado fino

ABSTRACT

In earlier times, natural resources were considered by many to be inexhaustible and over the years, it is well known that these resources have been increasingly exploited, leading in some cases to scarcity. This situation has affected all sectors, especially construction, since it is one of the industry sectors with the highest consumption of raw materials and waste production.

Building materials contribute to climate change from the greenhouse effect by releasing large amounts of CO₂ into their production. Portland cement is one of the great examples, more specifically in the production of its main constituent, clinker. According to the World Resources Institute, Portland cement production accounts for 5% of global CO₂ emissions and 3.8% of global energy.

The present dissertation aims to apply Construction and Demolition Waste (CDW) as total replacement of CEN normalized sand and partial Portland cement for use in concrete, as well as to evaluate its effects on durability. Thus, a resistance and durability study of mortars with substitution of 100% CEN sand by fine CDW aggregate and replacement of 5% of Portland cement by fines obtained by grinding fine CDW aggregate was performed. Fine CDW aggregates result from CDW processing to obtain coarse aggregate that has various applications. The fine aggregate of CDW is normally discarded and landfilled and has no known applicability yet.

Control mortars with standard CEN sand and Portland cement (CEM I 42.5 R) were produced as well as equivalent mortars with 100% CEN sand substitution by CDW fine aggregate (same particle size), 5% cement replacement Portland by fine aggregate of previously ground CDW and with both substitutions.

For the various mortars, tests were carried out on specimens of different types, so that it was possible to analyze and study the properties of mechanical strength and durability, namely carbonation, chloride penetration resistance, resistivity, alkali-silica reaction resistance, external attack resistance, by sulfates and absorption by capillarity. The intensely laboratory work was supported by LEMC and LABEST.

Regarding the CDW mortar, the performance loss was not very significant for the resistances, with improvements for the capillary and alkali-silica reaction. For the 5CDWa mortar the results for the resistivities were acceptable, however, were unexpected due to the negative for capillary water absorption contrary to previous studies, making it advisable to repeat these tests with the same materials in order to identify the cause. The CDWs + 5CDWa mortar generally presented a more negative behavior and there was a synergistic effect between the two additions except for capillary absorption and for alkali-silica expansions where they had positive performances. With this study, it was concluded that CDW mortar can be used as a 100% replacement of CEN sand under certain conditions, thus contributing to the circular economy and sustainability in construction.

Finally, it is emphasized that further research is essential to introduce this waste into the construction industry, with more stringent requirements than currently applied for recycled coarse aggregate.

KEYWORDS: Construction and demolition waste, durability, mortar, fine recycled aggregate

ÍNDICE GERAL

1 INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2. ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR CONSTRUÇÃO	2
1.3. SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO	4
1.4. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
2 ESTADO DA ARTE	7
2.1. INTRODUÇÃO	7
2.2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)	7
2.2.1. CLASSIFICAÇÃO E COMPOSIÇÃO DOS RCD	8
2.2.2. PRODUÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	11
2.3. LEGISLAÇÃO APLICÁVEL PARA RCD	13
2.3.1. UTILIZAÇÃO DE RCD EM OBRA	15
2.3.2. METAS DE VALORIZAÇÃO DOS RCD	16
2.4. RESPONSABILIDADE NA GESTÃO DE RCD	17
2.4.1. GESTÃO DE RCD EM OBRAS PARTICULARES NÃO SUJEITAS A LICENCIAMENTO OU COMUNICAÇÃO PRÉVIA	17
2.4.2. GESTÃO DE RCD EM OBRAS PARTICULARES (E PÚBLICAS) SUJEITAS A LICENCIAMENTO OU COMUNICAÇÃO PRÉVIA	18
2.4.2.1. LICENCIAMENTO DE OPERAÇÕES DE GESTÃO RCD	18
2.4.2.2. REUTILIZAÇÃO DE ROCHAS E SOLOS	18
2.4.2.3. TRIAGEM E FRAGMENTAÇÃO DE RCD	19
2.4.2.4. TRANSPORTE	19
2.5. DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS	20
2.5.1. FATORES QUE INFLUENCIAM A DURABILIDADE	20
2.5.2. INDICADORES DE DURABILIDADE NO DESEMPENHO DO BETÃO	22
2.5.2.1. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS	22
2.5.2.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA	22
2.5.2.3. REAÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA (ASR)	22
2.5.2.4. RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS	23
2.5.2.5. PENETRAÇÃO DE CLORETOS	23
2.5.2.6. ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	24
2.5.2.7. CARBONATAÇÃO	24
2.6. UTILIZAÇÃO DE ADIÇÕES	24
2.7. EXPERIÊNCIAS COM RCD	25

2.7.1. OUTRAS APLICAÇÕES.....	28
-------------------------------	----

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL..... 31

3.1. INTRODUÇÃO 31

3.1.1. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	32
--------------------------------------	----

3.2. MATERIAIS UTILIZADOS..... 32

3.2.1. CIMENTO	32
----------------------	----

3.2.2. AREIA NORMALIZADA CEN	34
------------------------------------	----

3.2.3. ÁGUA	36
-------------------	----

3.2.4. SUPERPLASTIFICANTE	37
---------------------------------	----

3.2.5. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)	37
---	----

3.2.5.1. ORIGEM DA AMOSTRA	37
----------------------------------	----

3.2.5.2. CDWS (CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE SAND)	38
--	----

3.2.5.3. CDWA (CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE ADDITION)	40
--	----

3.3. ENSAIOS LABORATORIAIS REALIZADOS 44

3.3.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA AMOSTRA	44
--	----

3.3.2. MASSA VOLÚMICA DOS AGREGADOS	44
---	----

3.3.3. BLAINE	49
---------------------	----

3.3.4. ENSAIOS COM ARGAMASSA.....	52
-----------------------------------	----

3.3.4.1. COMPOSIÇÃO E FABRICO DOS PROVETES DE ARGAMASSA.....	52
--	----

3.3.4.2. AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE.....	55
---	----

3.3.4.3. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS.....	57
--------------------------------------	----

3.3.4.4. CARBONATAÇÃO ACELERADA	61
---------------------------------------	----

3.3.4.5. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO MÁXIMA ($H_{MÁX}$)	62
--	----

3.3.4.6. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO MÉDIA ($H_{MÉDIO}$).....	63
--	----

3.3.4.7. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	65
---	----

3.3.4.8. PENETRAÇÃO ACELERADA DE CLORETOS.....	70
--	----

3.3.4.9. RESISTIVIDADE.....	74
-----------------------------	----

3.3.4.10. RESISTIVIDADE PROVENIENTE DO ENSAIO DE CLORETOS	75
---	----

3.3.4.11. RESISTIVIDADE ASSOCIADA AO MÉTODO DOS DOIS ELÉTODOS.....	75
--	----

3.3.4.12. REAÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA.....	78
--------------------------------------	----

3.3.4.13. RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS.....	82
---	----

4 DISCUSSÃO E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS 87

4.1. INTRODUÇÃO 87

4.2. GRANULOMETRIA A LASER 87

4.3. ENSAIOS LABORATORIAIS REALIZADOS 88

4.3.1. MASSA VOLÚMICA DOS AGREGADOS	88
---	----

4.3.2. BLAINE	89
---------------------	----

4.3.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	89
4.3.4. RESISTIVIDADE	91
4.3.5. CARBONATAÇÃO	92
4.3.6. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	93
4.3.7. CLORETOS	94
4.3.8. REAÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA	94
4.3.9. SULFATOS	95
5 CONCLUSÃO	97
5.1. CONCLUSÕES GERAIS	97
5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

ANEXOS

Anexo 1 – Ficha Técnica do Cimento CEM I 42,5R (fornecida pela SECIL)

Anexo 2 – Declaração de desempenho do RCD (fornecida pela Resíduos de Construção e Demolição SA)

Anexo 3 – Certificado de Conformidade do Controlo de Produção em Fábrica (fornecida pela Resíduos de Construção e Demolição SA)

Anexo 4 – Trabalhabilidade das argamassas realizadas

Anexo 5 – Resistências Mecânicas aos 28 dias

Anexo 6 – Resistências Mecânicas aos 56 dias

Anexo 7 – Resistências Mecânicas aos 84 dias

Anexo 8 – Absorção de água por capilaridade

Anexo 9 – Profundidade de carbonatação ($h_{\text{médio}}$) AutoCAD

Anexo 10 – Expansões da reação Álcalis-sílica

Anexo 11 – Resistividade associada ao método dos dois elétrodos

Anexo 12 – Coeficiente de difusão de cloretos e Resistividade associada aos 56 dias

Anexo 13 – Expansão devida ao ataque por Sulfatos

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Previsões para o consumo de cimentos especiais, cimentos compostos e cimento Portland de 1995 até 2015	1
Figura 1.2 - Previsão do futuro crescimento populacional e consumo de betão	2
Figura 1.3 - Cidades devem liderar a transição para a economia circular.....	3
Figura 1.4 - Transição de economia linear para economia circular	3
Figura 1.5 - Prioridades da Construção Sustentável (Mateus, 2009)	5
Figura 2.1 - Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	8
Figura 2.2 - Composição na zona Litoral Norte de Portugal de RCD (Rocha, 2016)	11
Figura 2.3 - Principais origens, tipos de resíduos e materiais recuperados por tipo de obra na União Europeia	11
Figura 2.4 - Princípios da Gestão de Resíduos	13
Figura 2.5 -Triagem e Valorização de RCD	19
Figura 2.6 - Esquema para a determinação dos processos que condicionam a composição do betão	21
Figura 2.7 - O edifício "Waldspirale" de apartamentos, localizado em Darmstadt, Alemanha	27
Figura 2.8 - Centro de Ciência e Tecnologia em Heilbronn, Alemanha	28
Figura 3.1 - Curva granulométrica laser do CEM I 42,5 R	34
Figura 3.2 - Areia normalizada CEN	34
Figura 3.3 - Peneiração mecânica para determinar análise granulométrica da areia CEN.....	35
Figura 3.4 - Massa retida em cada peneiro relativamente aos 3 sacos de areia CEN.....	35
Figura 3.5 - Curva granulométrica da areia normalizada CEN	36
Figura 3.6 - Processo dos RCD na Resíduos de Construção e Demolição, SA	37
Figura 3.7 - Agregados e resíduos na Resíduos de Construção e Demolição, SA.....	38
Figura 3.8 - Amostras de agregado britado fino recolhidas (0-10 mm)	38
Figura 3.9 - Material após lavagem, pronto para colocar na estufa a (110±5) °C.	39
Figura 3.10 - Material depois da secagem (atingindo massa constante)	39
Figura 3.11 - Peneiração manual	39
Figura 3.12 - Curva granulométrica do RCD.....	40
Figura 3.13 - Moinho Retsch PM100	41
Figura 3.14 - Colocação de 150 g de rejeitado do CDWs passado no #0,063 mm no almofariz com cerca de 100 g de álcool	41
Figura 3.15 – Moagem durante 15 min com esferas de zircónio de 20 mm (Fase 1)	42
Figura 3.16 - Moagem durante 10 min com esferas de 1 mm (Fase 2).....	42
Figura 3.17 - CDWa após secagem e peneiração mecânica e manual.....	42

Figura 3.18 - Curva granulométrica com ultrassons do CEM I, CDWa (CDW moído) e CDWs passado no peneiro 0,063 mm (CDW não moído).....	43
Figura 3.19 - Amostra seca de RCD dividida em duas partes	45
Figura 3.20 - Picnómetro com o preparado em banho maria (22±3) °C	45
Figura 3.21 - Adição de água para fazer transbordar o picnómetro	46
Figura 3.22 - Registo da temperatura da água	46
Figura 3.23 – Decantação da maior parte da água que cobre o provete com auxílio de um filtro	46
Figura 3.24 - Orientações relativas ao estado saturado com superfície seca dos agregados finos.....	47
Figura 3.25 – Agregado ligeiramente húmido	48
Figura 3.26 – Agregado quase seco, sem cume evidente	48
Figura 3.27 - Equipamento para determinar a superfície específica – Blaine	49
Figura 3.28 - Pesagem do material	50
Figura 3.29 - Equipamento para verificar as quantidades de material necessárias para ensaiar	50
Figura 3.30 - Procedimento de fabrico de argamassas	52
Figura 3.31 - Procedimento de fabrico das argamassas com substituição de areia (CDWs e CDWs+5CDWa).....	53
Figura 3.32 - Compactação dos provetes prismáticos para os ensaios de Resistências Mecânicas, Resistividade e Carbonatação Acelerada (1ª camada).....	54
Figura 3.33 - Compactação na mesa vibratória dos provetes cilíndricos	54
Figura 3.34 - Moldagem dos provetes prismáticos para o ensaio de Resistência por Sulfatos	55
Figura 3.35 - Moldagem dos provetes prismáticos para o ensaio de Resistência Álcis-Sílica	55
Figura 3.36 - Compactação (Esq. e Centro) e espalhamento da argamassa (Dir.).....	56
Figura 3.37 - Moldagem dos provetes.....	57
Figura 3.38 - Provetes após desmoldagem.....	58
Figura 3.39 - Ensaio de resistência à flexão	58
Figura 3.40 - Ensaio de Resistência à Compressão	59
Figura 3.41 - Comparação das resistências à flexão das argamassas em estudo aos 28, 56 e 84 dias	60
Figura 3.42 - Comparação das resistências à compressão das argamassas em estudo aos 28, 56 e 84 dias	61
Figura 3.43 - Provetes pulverizados com solução de fenolftaleína.....	62
Figura 3.44 - Representação da profundidade de carbonatação (h)	63
Figura 3.45 - Medição das profundidades de carbonatação segundo a recomendação (RILEM CPC-18)	64
Figura 3.46 - Medição do nível de água	66

Figura 3.47 - Equipamento para ensaio de absorção	66
Figura 3.48 - Excesso de água retirado	67
Figura 3.49 - Pesagem dos provetes	67
Figura 3.50 - Relação entre a absorção de água e a raiz do tempo nas primeiras 4h dos provetes de CTL1	68
Figura 3.51 - Relação entre a absorção de água e a raiz do tempo nas primeiras 4h dos provetes de CTL2	68
Figura 3.52 - Relação entre a absorção de água e a raiz do tempo nas primeiras 4h dos provetes de CDWs	69
Figura 3.53 - Relação entre a absorção de água e a raiz do tempo nas primeiras 4h dos provetes de 5CDWa	69
Figura 3.54 - Relação entre a absorção de água e a raiz do tempo nas primeiras 4h dos provetes de CDWs+5CDWa	70
Figura 3.55 - Provetes na câmara de vácuo	71
Figura 3.56 - Colocação dos provetes nas células com NaOH e NaCl	72
Figura 3.57 - Passagem de corrente elétrica aos provetes	72
Figura 3.58 - Medição da profundidade de penetração de cloretos	73
Figura 3.59 - Esquema de ensaio e equipamentos para o ensaio de resistividade	76
Figura 3.60 - Resistividade média pelo método dos 2 elétrodos aos 28,56 e 84 dias	78
Figura 3.61 - Provetes ASR da argamassa CDWs	79
Figura 3.62 - Colocação dos provetes ASR numa caixa com água	79
Figura 3.63 - Medição do comprimento real de um dos provetes CTL2 de ASR com defletómetro	80
Figura 3.64 - Representação gráfica das expansões ASR dos provetes comparativamente aos controlos, para todas as idades	81
Figura 3.65 - Provetes de resistência ao ataque por sulfatos numerados e identificados	83
Figura 3.66 - Provetes imersos na solução saturada de CaOH	83
Figura 3.67 - Provetes imersos na solução saturada de Na ₂ SO ₄	84
Figura 3.68 - Evolução da expansão média devida ao ataque por sulfatos nas argamassas.....	85
Figura 5.1 - Comparação geral dos resultados das argamassas em estudo	99

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificações dos RCD (Vieira e Pereira, 2013)	8
Tabela 2.2 - Capítulo 17 da Lista Europeia de Resíduos (relativa aos RCD) (LER, 2004)	9
Tabela 2.3 - Percentagem de Produção de RCD por tipo de obra, na União Europeia (Costa, 2014)	12
Tabela 2.4 - Causas da produção de RCD associadas à construção (Costa, 2014)	12
Tabela 2.5 - Documentos legislativos relacionados com RCD em vigor em Portugal (APA, 2020)	14
Tabela 2.6 - Valores estatísticos de produção e reciclagem/reutilização de RCD na União Europeia em 2011 (Vieira e Pereira, 2013)	16
Tabela 2.7 - Destino/Aplicações dos vários Resíduos de Construção e Demolição (Silva, 2016)	29
Tabela 3.1 - Ensaio Mecânicos (NP EN 196-1 2017) (Secil)	32
Tabela 3.2 - Ensaio Físicos (Secil)	32
Tabela 3.3 - Análise Química (Secil)	33
Tabela 3.4 - Análise Mineralógica (Secil)	33
Tabela 3.5 - Composição granulométrica da areia normalizada CEN ((NP EN 196-1 2017))	35
Tabela 3.6 - Composição granulométrica média das amostras de areia normalizada CEN no LEMC	36
Tabela 3.7 – Granulometria (incorreta) a laser do CEM I, CDWa e rejeitado de CDWs passado no #0,063 mm	43
Tabela 3.8 - Granulometria com ultrassons do CEM I, CDWa e rejeitado do CDWs passado no #0,063 mm	43
Tabela 3.9 - Composição Química do RCD da mesma origem, determinada pelo LNEG (Silva, 2016) e (Alonso, 2016)	44
Tabela 3.10 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica	49
Tabela 3.11 - Tempos medidos em segundos para cada amostra de CEM I 42,5 R e CDWa	51
Tabela 3.12 - Quantidades dos materiais para as argamassas de controlo	52
Tabela 3.13 - Quantidades dos componentes para cada argamassa	53
Tabela 3.14 - Particularidades da moldagem para cada ensaio (Rocha, 2016)	54
Tabela 3.15 - Valores da trabalhabilidade média de todas as argamassas	56
Tabela 3.16 - Resistência à flexão média (cura de 28 dias)	59
Tabela 3.17 - Resistências à flexão médias (cura de 56 dias)	59
Tabela 3.18 - Resistências à flexão médias (cura de 84 dias)	60
Tabela 3.19 - Resistências à compressão médias (cura de 28 dias)	60
Tabela 3.20 - Resistências à compressão médias (cura de 56 dias)	60
Tabela 3.21 - Resistências à compressão médias (cura de 84 dias)	61
Tabela 3.22 - Profundidade de carbonatação após 5 semanas (h_{\max})	63

Tabela 3.23 - Profundidade de carbonatação para cada argamassa ($h_{\text{médio}}$) AutoCAD (cura de 56 dias)	64
Tabela 3.24 - Profundidade média ($h_{\text{médio}}$) segundo a recomendação (LNEC E 391 1999; RILEM CPC-18) (cura de 56 dias)	65
Tabela 3.25 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade (cura de 2 meses)	70
Tabela 3.26 - Coeficientes de difusão dos cloretos (2 meses de cura)	74
Tabela 3.27 - Resistividade proveniente do ensaio de cloretos aos 56 dias (2 meses de cura)	75
Tabela 3.28 - Resistividade associada ao método dos dois elétrodos aos 28 dias	76
Tabela 3.29 - Resistividade associada ao método dos dois elétrodos aos 56 dias	76
Tabela 3.30 - Resistividade associada ao método dos dois elétrodos aos 84 dias	77
Tabela 3.31 - Expansões ASR ao fim de 16 dias (cura acelerada)	81
Tabela 3.32 - Expansões médias (%) resultantes do ataque por sulfatos ao longo de 26 semanas (cura de 28 dias numa solução saturada de hidróxido de cálcio)	85
Tabela 4.1 - Dimensões características do cimento e do RCD utilizados nos diferentes programas experimentais	87
Tabela 4.2 - Massas volúmicas determinadas para o cimento e para as diferentes amostras de RCD	88
Tabela 4.3 - Superfície específica para o cimento e as diferentes amostras de RCD	89
Tabela 4.4 - Resistências médias à compressão, desempenhos e desvio padrão para todas as argamassas	90
Tabela 4.5 - Desempenhos das resistências mecânicas à compressão para todas as argamassas	91
Tabela 4.6 - Resistividades provenientes dos dois métodos de ensaio aos 56 dias	91
Tabela 4.7 - Resistividade e Desempenhos provenientes do método dos 2 elétrodos para todas as argamassas a idades diferentes	92
Tabela 4.8 - Profundidade de carbonatação média para todas as argamassas	92
Tabela 4.9 - Coeficientes de absorção por capilaridade para todas as argamassas	93
Tabela 4.10 - Coeficientes de difusão de cloretos para todas as argamassas	94
Tabela 4.11 - Expansões ASR para todas as argamassas	95
Tabela 4.12 - Expansões médias resultantes do ataque de sulfatos no decorrer do tempo de duração do ensaio para todas as argamassas em estudo	95
Tabela 5.1 - Resultados obtidos dos ensaios realizados	97

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

μm – Micrómetro

$(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O})$ – Sulfoaluminato de cálcio hidratado

5CDWa – Argamassa com substituição de 5% de cimento Portland por agregado fino de RCD moído

Al_2O_3 – Aluminatos de cálcio hidratados do cimento ou alumina reativa dos agregados

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

ASR (ou RAS, em português) – Reação álcali-silica

ASTM – American Society for Testing and Materials

ASWP – Associação Smart Waste Portugal

C_3A – Aluminato Tricálcico

$\text{Ca}(\text{CO}_3)$ – Carbonato de cálcio

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ – Hidróxido de cálcio

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – Sulfato de cálcio bi-hidratado

CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais

CCP – Código de contratos públicos

CEM I 42,5 R – Cimento Portland de classe I 42,5 R

CEN – Comité Europeu de Normalização

CDW (ou RCD, em português) – Construction and demolition waste (Resíduos de construção e demolição)

CDWs – Argamassa com substituição de 100% de areia normalizada CEN por agregado fino de RCD

CDWa – Agregado fino de RCD moído

CV – Coeficiente de variação

CDWs + 5CDWa – Argamassa com substituição de 100% de areia normalizada CEN por agregado fino de RCD e substituição de 5% de cimento Portland por agregado fino de RCD moído

CEM I 42,5R – Cimento Portland da classe I 42,5R

CO_2 – Dióxido de carbono

CTL – Argamassa de controlo (0% de substituição)

DL – Decreto-Lei

Dns – Coeficiente de Difusão Aparente

EC – Economia Circular

H_2SO_4 – Águas das chuvas ácidas com ácido sulfúrico

LABEST – Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural

LEMC – Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção

LER – Lista Europeia de Resíduos

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

mA – Milliampere

MPa – Megapascal

Na – Agregado natural

NaCl – Cloreto de sódio

NaOH – Hidróxido de sódio

Na₂SO₄ – Sulfato de sódio anidro

ONU – Organização das Nações Unidas

Pa – Pascal

PCB – Contaminados com bifenilas policloradas

q.b. – Quanto baste

RA – Agregado reciclado

RAC – Betão com agregado reciclado

RJUE – Regime Jurídico de Urbanização e de Edificação

RSU – Resíduos sólidos urbanos

SO₃ – Óxido sulfúrico

SO₄²⁻ – Iões sulfato

TSMA – Two stage mixing method (método de mistura em duas etapas)

UE – União Europeia

UNEP – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

V - Volt

1 INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A produção dos materiais de construção contribui para as alterações climáticas provocadas pelos gases com efeito estufa, principalmente graças à libertação de grandes quantidades de CO₂ na sua produção. O cimento Portland é um dos grandes exemplos, mais propriamente na produção do seu principal constituinte, o clínquer. Segundo a World Resources Institute, a produção de cimento Portland é responsável por 5% das emissões globais de CO₂ e 3,8% de energia global.

Grande parte das emissões resultantes da produção do clínquer Portland resultam da descarbonatação do calcário pelo que, enquanto a maioria dos ligantes forem à base de clínquer Portland será difícil reduzir as emissões com esta origem. Tem sido feito um esforço grande a nível internacional de forma a reduzir o consumo de clínquer por uso de adições, sobretudo pozolânicas para substituir parcialmente o clínquer Portland. A utilização de cimentos com adições (compostos) tem crescido e estima-se que o uso de cimento Portland continuará a diminuir (Figura 1.1). Aliás, já há anos que as normas preconizam o uso de cinzas volantes, escória de alto forno moída, sílica de fumo e mesmo de filler, por exemplo calcário. A maioria destas adições conduzem a produtos hidratados semelhantes aos do cimento Portland e acresce que, em geral a durabilidade do betão vem melhorada. Outra vantagem tem a ver com o facto de se utilizarem resíduos que de outra forma poderiam ir para aterro. Assim, usar adições, sobretudo provenientes de resíduos contribui para a sustentabilidade e durabilidade e, portanto, para a Economia Circular.

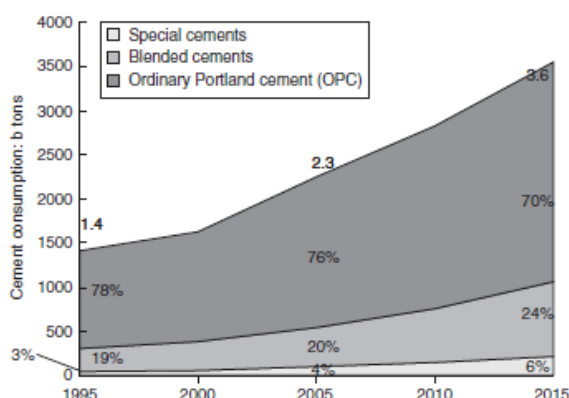


Figura 1.1 – Previsões para o consumo de cimentos especiais, cimentos compostos e cimento Portland de 1995 até 2015

Fonte: (Forde, 2009)

Outra questão importante relaciona-se com o uso de RCD em betão novo. Como se sabe, produz-se cerca de 1 m³ de betão por pessoa por ano (Metha e Monteiro, 2008), segundo material mais usado no mundo a seguir à água (Figura 1.2). Como a produção do betão é em grandes porções, existe a possibilidade de escoar grandes quantidades de resíduos, se compatíveis e não prejudiciais. Assim, tem sido estudado o uso de resíduos de construção e demolição com o intuito de utilizar como agregado em betão novo. Essa investigação levou a que hoje seja possível de acordo com as normas utilizar o agregado grosso de RCD em betão. No entanto, como ainda não é possível usar legalmente o agregado fino de RCD há que prosseguir com a investigação nesse sentido.

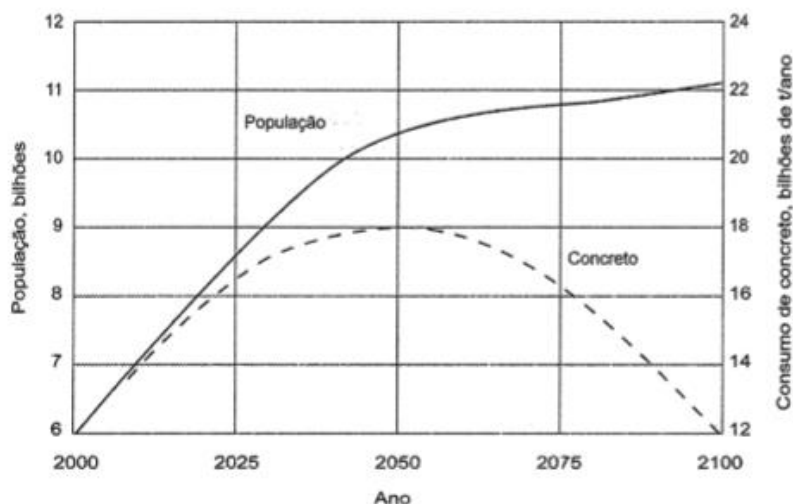


Figura 1.2 - Previsão do futuro crescimento populacional e consumo de betão

Fonte: (Metha e Monteiro, 2008)

Desta forma, considerando estas duas vertentes, a investigação levada a cabo nesta dissertação envolve o estudo do uso de agregado fino proveniente do processamento de RCD e ainda, da sua parte que foi processada mecanicamente por moagem.

1.2.ECONOMIA CIRCULAR NO SETOR CONSTRUÇÃO

Atualmente, no nosso planeta habitam cerca de 7,7 bilhões de indivíduos e, como a população mundial está em constante crescimento, estima-se um aumento para os 9,7 bilhões em 2050, previsão tendo em conta um aumento da esperança de vida e taxas de fertilidade descendentes (ONU, 2019). O crescimento populacional originará um aumento de diferentes indústrias para satisfazerem as necessidades de consumo, tais como a construção, que conduzem a uma grande produção de resíduos ainda incipientemente reciclados e com riscos a nível ambiental, contaminação de água e redução da biodiversidade. Assim, de forma a acompanhar o aumento do crescimento populacional e as condições anteriormente mencionadas, prevê-se que em 2050 iria ser necessário extrair 180 bilhões de toneladas de matérias-primas, 8 vezes mais do que no ano de 1970, ou seja, cerca de três planetas Terra em recursos, que não possuímos (UNEP, 2016).

As cidades, são ocupadas por cerca de metade da população mundial (3,5 bilhões de pessoas), uma vez que para o ser humano, nas áreas urbanas parece haver mais respostas para as adversidades diárias, como por exemplo na saúde e na educação.

Os níveis de consumo de energia e a poluição são fatores muito preocupantes, na atualidade. Embora as cidades ocupem apenas 3% da Terra, representam 60-80% das emissões globais e consomem 75% dos recursos globais (ONU, 2018b) (Figura 1.3).



Figura 1.3 - Cidades devem liderar a transição para a economia circular

Fonte: (Metabolic, 2017) – Tradução livre

Assim, o desenvolvimento das cidades remete para o setor da construção civil, que é responsável por uma grande percentagem de produção de resíduos. A sua gestão nociva, poderá resultar no depósito ilegal de resíduos no ambiente, degradando as paisagens, criando passivos ambientais e podendo apresentar riscos para a saúde humana (utilização de amianto) (ASWP, 2018).

Neste contexto, introduz-se a economia circular, que tem como objetivo alterar os planos lineares para circulares, isto é, transformar o trajeto extrair-usar-descartar, onde os materiais têm uma vida de duração curta e única para um percurso onde é reduzida a extração de matérias primas, prolonga-se o uso dos produtos e renova-se de forma que haja a diminuição dos resíduos num ciclo económico regenerativo e sem desperdícios (Konstantinovas, Bento e Sanches, 2019) (Figura 1.4).

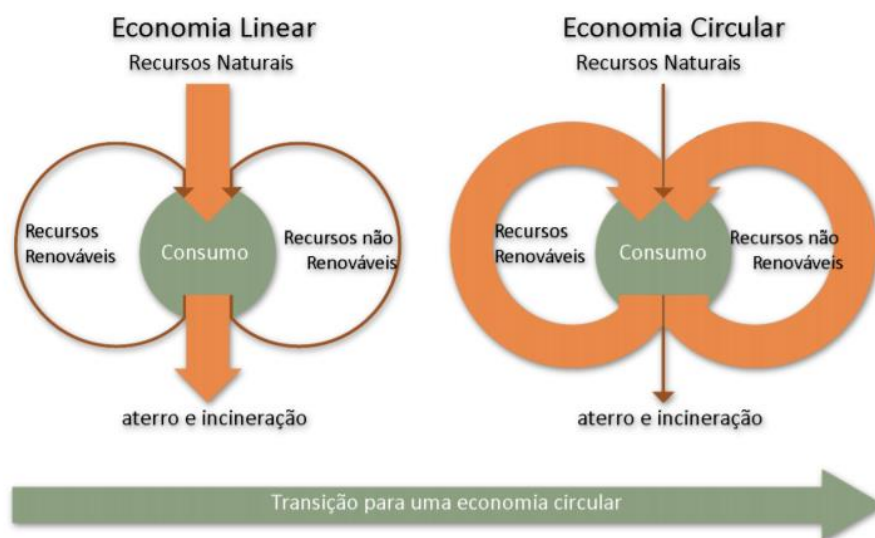


Figura 1.4 - Transição de economia linear para economia circular

Fonte: (Konstantinovas, Bento e Sanches, 2019)

A economia circular proporciona tanto a reutilização de materiais obtidos no fim de vida das edificações, como a reintrodução de resíduos na produção de materiais novos. Desta maneira, deveria se optar por desconstruir passo a passo os edifícios, em vez de os demolir de uma só vez, já que, da primeira forma, poderia se avaliar os materiais, para uma separação adequada dos mesmos, uma possível reutilização e eliminação da produção de resíduos (Quercus, 2018). O grande objetivo da EC é eliminar ou reduzir ao máximo os resíduos não utilizados e descartados, assim como regular a extração de materiais da natureza através da realização e melhoramento de ciclos de matérias e produtos (Konstantinovas, Bento e Sanches, 2019). A aplicação deste modelo associada ao setor construção, não só irá ser benéfico pelos motivos anteriores explicados como para a criação de postos de trabalho de mão de obra qualificada (profissionais relacionados com o setor) e também, benefícios ambientais, nomeadamente, a redução da pegada de carbono e o desvio de resíduos do aterro.

1.3.SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO

A indústria da construção é um dos setores económicos mais influentes em toda a Europa. No entanto, a construção está relacionada com excessivos consumos e utilização de matérias-primas e recursos energéticos não renováveis. Este setor continua a optar por mão-de-obra não qualificada e predominantemente em técnicas e procedimentos de construção tradicional. Na atualidade, tem se vindo a provar que não há compatibilidade entre os propósitos da sustentabilidade e os consumos energéticos e materiais, parecendo cada vez mais improvável conjugar a harmonia entre sociedade, economia e ambiente. O meio urbano, como mencionado anteriormente, é o principal responsável por produzir emissões de gases com efeito de estufa e consumir quase metade de energia que é produzida (Figura 1.3). É necessário assegurar a conservação do nosso planeta e espécie, melhorando as práticas comuns em todos os setores, persistindo no da construção onde se verificará o maior impacto na prevenção e redução das alterações climáticas (Nunes, 2015).

No continente Europeu, as zonas edificadas contribuem em média, com 85% do impacto energético-ambiental, ao longo da utilização e vida dos edifícios (fase de operação) e, cerca de 15% desse impacto corresponde à fase de construção e demolição. É com a consciência destes números, que a sustentabilidade deverá ser ponderada e introduzida, sendo implementadas medidas que aumentem a eficiência do desempenho ao longo da vida útil dos edifícios, que é o mais importante para reduzir o consumo de energia e outros recursos (Tirone e Nunes, 2007). Em Portugal, embora os dados estatísticos não coincidam com a realidade, estes mostram que no decorrer da sua fase de utilização, a parte edificada, mais propriamente, serviços e habitação constituem um consumo de 20% dos recursos energéticos nacionais, 6,7% do consumo de água e uma produção anual de 420 milhões de metros cúbicos de águas residuais (Nunes, 2015).

Charles J. Kibert criou o conceito de construção sustentável definindo-o como *“a criação e manutenção responsáveis de um ambiente construído saudável, baseado na utilização eficiente de recursos e em p* . Os sete princípios em que assenta a construção sustentável e que devem ser aplicados durante todo o ciclo de vida de construção, são os seguintes (Kibert, 1994):

- Reduzir – Redução do consumo de recursos;
- Reutilizar – Aumento da reutilização de recursos;
- Reciclar – Utilização de materiais recicláveis e reciclados;
- Natureza – Proteção do ambiente natural;
- Resíduos Tóxicos – Eliminação dos produtos tóxicos;
- Qualidade – Assegurar a qualidade;
- Economia – Analisar os custos do ciclo de vida.

Por muitas definições que existam em relação ao tema de construção sustentável, os conceitos principais baseiam-se nos três grandes aspetos de sustentabilidade: parte ambiental, social e económica. Na figura seguinte (Figura 1.5) apresentam-se as prioridades para a construção sustentável (Mateus, 2009):

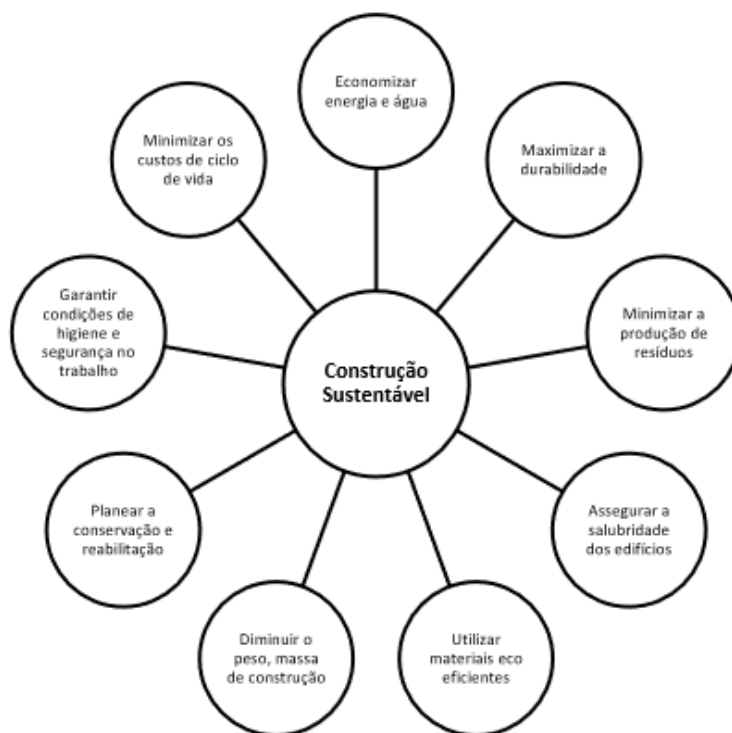


Figura 1.5 - Prioridades da Construção Sustentável (Mateus, 2009)

Assim, será necessário não só dar relevância à sustentabilidade na construção relacionada com as fases de projeto e execução de obra, como igualmente, nas fases após construção, para que seja possível dar continuidade à sustentabilidade. Algumas das medidas para que esta ideia seja suportada são as seguintes (Nunes, 2015):

- Poupança de água (sistema misturador com poupança de água para torneiras, redutores de caudal e poupança no autoclismo);
- Poupança de energia (substituição para lâmpadas fluorescentes, eletrodomésticos com melhores desempenhos energéticos e classes eficientes);
- Reutilização de resíduos da construção civil (centrais de reciclagem de resíduos de construção civil provenientes de demolições e construções e criação de legislação que obrigue ao uso de material reciclado em, pelo menos, nas obras públicas).

1.4.OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo a aplicação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) como substituição total de areia normalizada CEN e parcial do cimento Portland para uso em betão, bem como avaliar os seus efeitos nas resistências e durabilidade. Para tal, foi definido um programa experimental, com o intuito de analisar e estudar o comportamento das argamassas com este resíduo integrado, sendo o propósito final a utilização em betão.

Esta dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos, nos quais são abordados os seguintes conteúdos:

O Capítulo 1 (Introdução) consiste no enquadramento do tema de trabalho, referindo os impactes ambientais provocados pelo setor da construção, no que diz respeito à indústria do cimento e à produção de resíduos. Para além disso, referencia-se sinteticamente os temas de economia circular e sustentabilidade na construção.

No Capítulo 2 (Estado de Arte) apresentam-se os princípios que permitiram o desenvolvimento deste trabalho, a começar pelo material em estudo (Resíduos de Construção e Demolição), assim como, a sua origem, classificação e composição, legislação, gestão, destino, aplicações, durabilidade e estudos.

No Capítulo 3 (Programa Experimental) realiza-se a caracterização dos materiais aplicados, anunciam-se as distintas metodologias dos ensaios experimentais executados, sempre suportadas pela normalização e, também, apresentam-se os resultados obtidos acompanhados pelos seus desempenhos face às argamassas de referência.

No Capítulo 4 (Discussão e Comparação de Resultados) apresenta-se a discussão dos resultados dos ensaios obtidos no capítulo anterior, assim como, a sua comparação com resultados de estudos idênticos realizados como dissertações na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

No Capítulo 5 (Conclusão) são apresentadas as conclusões gerais da presente dissertação e as recomendações para futuros desenvolvimentos do tema em estudo.

2

ESTADO DA ARTE

2.1.INTRODUÇÃO

O presente capítulo tem como objetivo principal focar-se nos Resíduos de Construção e Demolição (RCD), tipo de resíduo que provém do setor da construção. Para além disso, retrata a sua origem, características, legislação aplicável, estudos e aplicações. Por sua vez, também é debatido o tema durabilidade, que se relaciona com a sustentabilidade na construção, uma vez que quanto mais duráveis as construções das estruturas menor o número de vezes que se terá que intervir com reabilitações.

2.2.RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

O ramo da construção é um dos mais abrangentes setores de todo o mundo, com responsabilidade na indústria de um país. Os resíduos provenientes da construção frequentemente eram depositados em lixeiras sem qualquer tipo de separação nem cuidados a nível de contaminações (ver Figura 2.1). Todavia, nos últimos anos começaram a surgir cuidados explícitos sobre a gestão dos resíduos resultantes desta atividade, um dos maiores fluxos de resíduos existentes no nosso país (Vieira e Pereira, 2013).

Ao longo dos anos, foram realizados extensos trabalhos de pesquisa para avaliar as diferentes propriedades do betão com agregados reciclados e, de acordo com estudos anteriores foi possível verificar que este tipo de agregados poderiam ser usados com sucesso como substitutos de agregados naturais para produzir betão, atendendo ao desempenho exigido de um betão estrutural comum. Hoje em dia, o betão com agregados reciclados é utilizado para aplicações estruturais e não estruturais. Foi estabelecido que seu uso é viável a nível técnico e comercial (Behera et al., 2014).



Figura 2.1 - Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

Fonte: (EuroSeparadora)

2.2.1. CLASSIFICAÇÃO E COMPOSIÇÃO DOS RCD

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) derivam de processos de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação, demolição e derrocada de edificações, usualmente associadas ao setor da construção civil, mais precisamente, operações em obras de construções, demolições e operação de manutenção, restauro, remodelação e reabilitação de construções previamente existentes.

Na Tabela 2.1 apresentam-se as formas de classificação dos RCD, que dependem da sua origem, propriedades químicas, ou até mesmo possibilidades de reciclagem, entre outras. É preciso ter em consideração tanto as vantagens como as limitações, em situações específicas (Vieira e Pereira, 2013).

Tabela 2.1 - Classificações dos RCD (Vieira e Pereira, 2013)

Classificação de acordo com a Lista Europeia de Resíduos com o Código 170000, sendo que os últimos 4 dígitos variam de acordo com o tipo de RCD em questão.	A Lista Europeia de Resíduos foi transposta pela Portaria n.º 209/2004, de 3 de Março. Nesta lista os resíduos de construção e demolição são classificados com o Código 170000, sendo que os últimos 4 dígitos variam de acordo com o tipo de RCD em questão.
Classificação de acordo com o tipo de obra	<u>Resíduos de construção</u> – resíduos provenientes de obras novas de construção de edifícios e infraestruturas; <u>Resíduos de demolição</u> – resíduos provenientes de obras de demolição de edifícios ou infraestruturas; <u>Resíduos de reparação</u> – resíduos resultantes de obras de remodelação e reparação de edifícios e infraestruturas.
Classificação segundo o tipo de material que se encontra presente	<u>Resíduos inertes</u> – terras, argamassas, tijolos, telhas, alvenaria, etc.; <u>Resíduos não inertes</u> – embalagens diversas, plásticos, madeiras, metais, vidros, etc.;

Classificação segundo o destino final dos resíduos	<u>Resíduos perigosos</u> – óleos usados, latas de tintas e solventes, amianto, etc.
	<u>Resíduos recicláveis</u> – resíduos que podem ser reciclados.
	<u>Resíduos não recicláveis</u> – resíduos que, devido às características ou por se encontrarem contaminados, não podem ser reciclados.

Como os RCD são extraídos através do processamento dos detritos gerados a partir da demolição de estruturas de betão, restos de embalagens e outros detritos de construção, é normal que a sua constituição tenha diferentes tipos de material (Behera et al., 2014).

Deste modo, para efeitos legais os RCD devem ser classificados de acordo com a Lista Europeia de Resíduos - (LER, 2004), que foi criada com o intuito de uniformizar e simplificar a identificação dos mesmos, entrando em vigor no nosso país em virtude da (Portaria, n.º 209/2004), de 3 de Março. Os resíduos de construção e demolição podem ser constituídos por (Vieira e Pereira, 2013):

- Betão, tijolos, ladrilhos, telhas e material cerâmico;
- Madeira, vidro e plástico;
- Misturas betuminosas, alcatrão e produtos de alcatrão;
- Metais (incluindo ligas);
- Solos (incluindo solos escavados de locais contaminados), rochas e lamas de dragagem;
- Materiais de isolamento e materiais de construção contendo amianto;
- Materiais de construção à base de gesso;
- Outros resíduos de construção e demolição

Na Tabela 2.2 observam-se os códigos e respetivas descrições dos resíduos de construção e demolição de acordo com (LER, 2004), identificando-se sempre por um código que começa por 17 e com quatro últimos dígitos que variam segundo o tipo de RCD:

Tabela 2.2 - Capítulo 17 da Lista Europeia de Resíduos (relativa aos RCD) (LER, 2004)

Código LER	Descrição
17 01	<u>Betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos:</u>
17 01 01	Betão.
17 01 02	Tijolos.
17 01 03	Ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos.
17 01 06	Misturas ou frações separadas de betão, tijolos, ladrilhas, telhas e materiais cerâmicos contendo substâncias perigosas.
17 01 07	Misturas de betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos não abrangidas em 17 01 06.
17 02	<u>Madeira, vidro e plástico:</u>
17 02 01	Madeira.
17 02 02	Vidro.
17 02 03	Plástico.
17 02 04	Vidro, plástico e madeira contendo ou contaminados com substâncias perigosas.
17 03	<u>Misturas betuminosas, alcatrão e produtos de alcatrão:</u>
17 03 01*	Misturas betuminosas contendo alcatrão
17 03 02	Misturas betuminosas não abrangidas em 17 03 01.
17 03 03*	Alcatrão e produtos de alcatrão.
17 04	<u>Metais (incluindo ligas):</u>
17 04 01	Cobre, bronze e latão.
17 04 02	Alumínio.

17 04 03	Chumbo.
17 04 04	Zinco.
17 04 05	Ferro e aço.
17 04 06	Estanho.
17 04 07	Mistura de metais.
17 04 09	Resíduos metálicos contaminados com substâncias perigosas.
17 04 10*	Cabos contendo hidrocarbonetos, alcatrão ou outras substâncias perigosas.
17 04 11	Cabos não abrangidos em 17 04 10.
17 05	<u>Solos (incluindo solos escavados de locais contaminados), rochas e lamas de dragagem:</u>
17 05 03*	Solos e rochas contendo substâncias perigosas.
17 05 04	Solos e rochas não abrangidos em 17 05 03.
17 05 05	Lamas de dragagem contendo substâncias perigosas.
17 05 06	Lamas de dragagem não abrangidas em 17 05 05.
17 05 07	Balastros de linhas de caminho-de-ferro contendo substâncias perigosas.
17 05 08	Balastros de linhas de caminho-de-ferro não abrangidos em 17 05 07.
17 06	<u>Materiais de isolamento e materiais de construção contendo amianto:</u>
17 06 01	Materiais de isolamento contendo amianto.
17 06 03	Outros materiais de isolamento contendo ou constituídos por substâncias perigosas
17 06 04	Materiais de isolamento não abrangidos em 17 06 01 e 17 06 03.
17 06 05	Materiais de construção contendo amianto (4)
17 08	<u>Materiais de construção à base de gesso:</u>
17 08 01	Materiais de construção à base de gesso contaminados com substâncias perigosas.
17 08 02	Materiais de construção à base de gesso não abrangidos em 17 08 01.
17 09	<u>Outros resíduos de construção e demolição:</u>
17 09 01*	Resíduos de construção e demolição contendo mercúrio.
17 09 02	Resíduos de construção e demolição contendo PCB (por exemplo, vedantes com PCB, revestimentos de piso à base de resinas com PCB, envidraçados vedados contendo PCB, condensadores com PCB).
17 09 03*	Outros resíduos de construção e demolição (incluindo misturas de resíduos) contêm substâncias perigosas.
17 09 04	Mistura de resíduos de construção e demolição não abrangidos em 17 09 01, 17 09 02 e 17 09 03.

***Resíduos Perigosos**

Quanto à composição dos RCD na zona Litoral Norte de Portugal, a porção relativa aos inertes (sem contabilizar os solos), aponta no geral, para cerca de 50% do volume total de resíduos de construção e demolição, em maioria constituídos por betão e materiais cerâmicos, que é justificável, dada à sua abrangente e constante aplicação em qualquer tipo de construção (Rocha, 2016) (Figura 2.2).

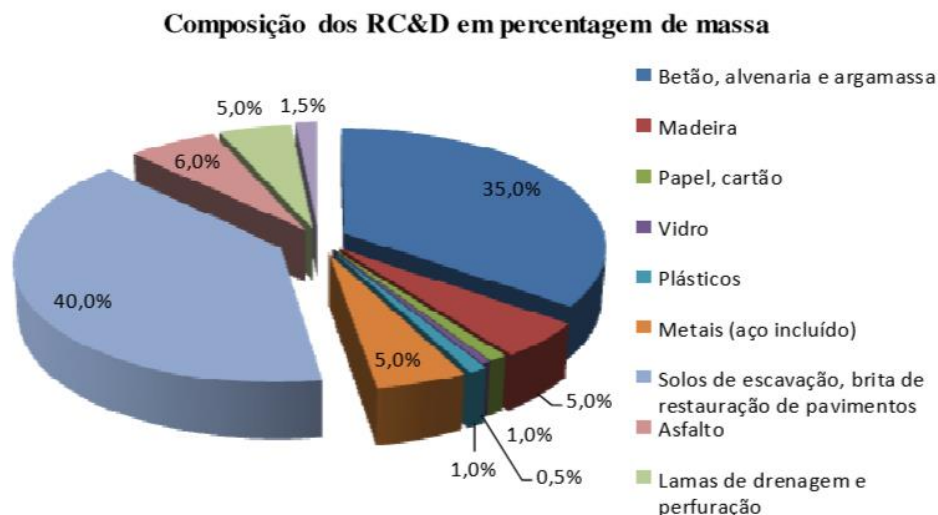


Figura 2.2 - Composição na zona Litoral Norte de Portugal de RCD (Rocha, 2016)

2.2.2. PRODUÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Os resíduos de construção e demolição podem ser classificados como:

- Resíduos de Construção;
- Resíduos de Demolição;
- Resíduos de Reparação.

Para cada classificação mencionada anteriormente (mediante o tipo de obra), na Figura 2.3, distinguem-se os tipos de resíduos, principais origens e materiais normalmente recuperados, enquanto na Tabela 2.3 as percentagens de produção diferentes (Costa, 2014):

Tipo de obra	Tipos de resíduos	Principais origens	Materiais normalmente recuperados
Demolição	Alvenarias, betão armado e betão pré-esforçado, metais ferrosos e não ferrosos, madeira, cerâmicos, plásticos, vidro, produtos de gesso e estuque, ferragens e guarnições e materiais de isolamento.	Edifícios residenciais e não residenciais, estruturas de engenharia civil (pontes, viadutos, chaminés, entre outros).	Metais para reciclagem, entulho para enchimentos, algumas ferragens e guarnições para revenda, alguma madeira para reutilização e pequenas quantidades de tijolos.
Construção	Na maioria, solos e rocha, desperdícios de tijolos e outros cerâmicos, restos de betão, aço, madeira, tintas e embalagens	Trabalhos de movimentação de terras, desperdícios e restos de materiais de trabalhos de construção.	Solos e rochas para enchimentos.
Reparação e manutenção	Semelhantes aos resíduos de demolição: betão, alvenaria, solos e produtos betuminosos.	Reabilitação e transformação de edifícios. Manutenção de sistemas de transporte.	Semelhantes aos resíduos de demolição. Entulho para enchimentos.

Figura 2.3 - Principais origens, tipos de resíduos e materiais recuperados por tipo de obra na União Europeia

Fonte: (Costa, 2014)

Tabela 2.3 - Percentagem de Produção de RCD por tipo de obra, na União Europeia (Costa, 2014)

Tipo de Obra	% de Produção total de RCD
Construção	10 - 20
Demolição	30 - 40
Remodelação, Reabilitação e Renovação	40 - 50

A produção de RCD pode ser gerada devido a inúmeros fatores, entre os quais, demolições de estruturas, danificações ou até mesmo por material de construção em excesso, as modificações de especificações ou normas podem levar também à não utilização do material, alterações nos projetos durante a construção, inexperiência dos projetistas em certos procedimentos de construção, mão-de-obra não qualificada, planeamento e local de armazenagem não adequados, entre muitas outras coisas.

Na Tabela 2.4, apresentam-se as fases e respetivas causas da produção de RCD no setor de construção civil (Costa, 2014):

Tabela 2.4 - Causas da produção de RCD associadas à construção (Costa, 2014)

Fase de Projeto	Falta de atenção na coordenação dimensional dos produtos
	Alterações realizadas no projeto durante o decorrer dos trabalhos
	Inexperiência do arquiteto na sequência e método da construção
	Falta de atenção aos tamanhos padrão existentes no mercado
	Falta de conhecimento do arquiteto quanto a produtos alternativos
	Complexidade de detalhes nos desenhos
	Falta de informação nos desenhos
	Caderno de encargos com erros e incompleto
	Seleção de produtos de baixa qualidade
Fase de Execução	Erros cometidos durante o transporte ou pelos operários
	Acidentes devido a negligência
	Danos no trabalho concluído causados por operações posteriores
	Uso incorreto do material que, por sua vez, exige substituição
	Atrasos na entrega de informação ao construtor sobre os produtos a serem utilizados
	Mau funcionamento dos equipamentos
	Condições climáticas adversas
	Aquisições de quantidades não exatas por falta de planeamento
	Danos durante o transporte
Manuseio de Materiais	Armazenamento inadequado que leva à deterioração ou danos dos materiais
	Materiais fornecidos em embalagens separadas (por exemplo, sacos de cimento)
	Utilização do material existente nas proximidades da obra, por mais que não seja o indicado
	Conflitos entre a equipa de projeto e os trabalhadores
	Roubo/vandalismo
Aspetos Contratuais	Erros de encomenda (por exemplo, encomendar materiais a mais ou a menos)
	Adquirir produtos que não cumprem as especificações
	Falta de possibilidades de encomendar menores quantidades

É possível verificar que a fase de construção detém a percentagem mais baixa em termos de produção de quantidade de resíduos. Isto deve-se ao facto de, provavelmente, existirem mais perdas nos processos construtivos (insuficiência no planeamento das obras e desperdícios dos estaleiros). No entanto, os

resíduos produzidos em demolições poderão alcançar uma percentagem de 80% do total dos resíduos se forem considerados, justificadamente, os trabalhos de reabilitação, remodelação e renovação como trabalhos de demolição, mesmo que seja parcialmente (Alonso, 2016).

2.3.LEGISLAÇÃO APLICÁVEL PARA RCD

Cada vez mais, são notórias as consequências relacionadas com o setor da construção civil, sendo a abundante produção de resíduos uma das principais, tanto em Portugal como na maioria dos países da União Europeia. Além das consideráveis quantidades, os resíduos apresentam outras singularidades que prejudicam a sua gestão, tais como as variadas dimensões, a constituição heterogénea das frações e os níveis de perigosidade distintos que lhes estão associados.

Além disso, a localização temporária e dispersa das obras, faz com que a atividade da construção civil sofra dificuldades no controlo e fiscalização a nível do desempenho ambiental. Ademais, as adversidades de quantificação dos resíduos, a não equilibrada deposição e a utilização de sistemas de tratamento não adequados causam também complicações ao setor em causa e à caracterização dos resíduos. Por estes motivos e devido à contribuição negativa das práticas do setor para com os propósitos nacionais e comunitários de desempenho ambiental, foi preparada uma legislação específica para o fluxo de Resíduos de Construção e Demolição (RCD).

Esta legislação traduzida no (Decreto-Lei, n.º 46/2008), 12 de março, todavia alterada pelo Decreto-Lei 73/2011, 17 de junho, corresponde ao processo de gestão das operações do RCD, considerando a sua reutilização e prevenção, assim como as suas ações de recolha, transporte, armazenagem, tratamento, valorização e eliminação (Figura 2.4). Assim, a APA apresenta a primeira de um conjunto de medidas legislativas e normativas, de forma a que se resolvam lacunas até agora existentes e se promova a prática da organização/hierarquia de resíduos (APA, 2020).



Figura 2.4 - Princípios da Gestão de Resíduos

Fonte: (PNGR, 2011)

Relativamente às restantes medidas com objetivo de minimizar os efeitos dos RCD no meio ambiente e promover o incentivo à reciclagem, reutilização e valorização, apresenta-se de seguida a legislação de apoio nestas circunstâncias, por ordem cronológica, em vigor em Portugal (Tabela 2.5):

Tabela 2.5 - Documentos legislativos relacionados com RCD em vigor em Portugal (APA, 2020)

Ano	Documento nacional principal	Definição
1996	Portaria n.º 15/96, 23 de janeiro	Aprova as operações de gestão de resíduos (revogada pela Portaria n.º 209/2004)
1997	Portaria n.º 335/97, 16 de Maio	Estabelece as regras de transporte de resíduos
	Portaria n.º 818/97, 5 de Setembro	Aprova a lista europeia de resíduos (revogada pela Portaria n.º 209/2004)
	Decreto-Lei n.º 239/97, 9 de Setembro	Estabelece as regras gerais de gestão de resíduos (revogado pelo DL n.º 178/2006)
1998	Portaria n.º 792/98, 22 de Setembro	Aprova a lista de resíduos industriais não perigosos (revogada pela Portaria n.º 1408/2006)
	Portaria n.º 961/98, 10 de Novembro	Legisla a autorização de processos de gestão de resíduos industriais urbanos e de outros tipos (revogada pelo DL n.º 178/2006)
1999	Decreto-Lei n.º 516/99, 9 de Agosto	Aprova o Plano Estratégico para os resíduos industriais não perigosos
	Decreto-Lei n.º 321/99, 9 de Agosto	Regula a instalação e a gestão de aterros de materiais não perigosos (revogada pelo DL n.º 152/2002)
2002	Decreto-Lei n.º 152/2002, 23 de Maio	Regula a instalação, utilização, encerramento e pós-encerramento de aterros (revogado pelo DL n.º 183/2009)
2004	Decreto-Lei n.º 3/2004, 3 de Janeiro	Define o regime jurídico do licenciamento, da instalação e da exploração dos centros integrados de recuperação, valorização e eliminação de resíduos perigosos
	Portaria n.º 209/2004, 3 de Março	Lista europeia de classificação de resíduos (LER)
2006	Decreto-Lei n.º 178/2006, 5 de Setembro	Define as regras gerais de gestão de resíduos (alterado pelo DL n.º 73/2011)
	Portaria n.º 1408/2006, 18 de Dezembro	Aprova o Regulamento do Sistema Integrado de Registo Eletrónico de Resíduos
2008	Decreto-Lei n.º 46/2008, 12 de Março	Estabelece o regime das operações de gestão de resíduos de construção e demolição, compreendendo a sua prevenção, reutilização, recolha, transporte, armazenamento, tratamento, valorização e eliminação
	Portaria n.º 417/2008, 11 de Junho	Aprova os modelos de guias de acompanhamento do transporte de resíduos de construção e demolição
2009	Decreto-Lei n.º 183/2009, 10 de Agosto	Regime jurídico da deposição de resíduos em aterro
2011	Decreto-Lei n.º 73/2011, 17 de Junho	Estabelece o regime das operações de gestão de resíduos e pretende clarificar as definições de resíduo, prevenção,

		reutilização, preparação para a reutilização, tratamento e reciclagem
2014	Portaria n.º 40/2014, 17 de Fevereiro	Estabelece as normas para a correta remoção dos materiais com amianto, inclusive os resíduos de construção e demolição com este material
2015	Despacho n.º 10401/2015, 7 de Setembro	Aprova os procedimentos a adotar no âmbito da gestão, tratamento e disponibilização da informação decorrente da aplicação da Portaria n.º 40/2014, de 17 de fevereiro
2017	Portaria n.º 145/2017, 26 de Abril	1 - Define as regras aplicáveis ao transporte rodoviário, ferroviário, fluvial, marítimo e aéreo de resíduos em território nacional e cria as guias eletrónicas de acompanhamento de resíduos (e-GAR), a emitir no Sistema Integrado de Registo Eletrónico de Resíduos (SIRER), disponível na plataforma eletrónica da Agência Portuguesa do Ambiente, I. P. (APA, I. P.), na Internet. 2 - Estabelece as normas para a correta remoção dos materiais contendo amianto e para o acondicionamento, o transporte e a gestão dos respetivos resíduos de construção e demolição (RCD) com amianto gerados, procedendo, ainda, à primeira alteração à Portaria n.º 40/2014, de 17 de fevereiro.
2018	Decreto-Lei n.º 63/2018, 10 de Outubro	Estabelece procedimentos e objetivos com vista à remoção de produtos que contêm fibras de amianto ainda presentes em edifícios, instalações e equipamentos de empresas

2.3.1. UTILIZAÇÃO DE RCD EM OBRA

Segundo o artigo 7.º do (Decreto-Lei, n.º 46/2008), o uso de Resíduos de Construção e Demolição em obra deverá ser acompanhado pelas normas técnicas nacionais e comunitárias adequáveis. Assim, em caso de não existência das mencionadas normas, devem ser aplicadas as especificações técnicas definidas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e homologadas pelos membros do Governo responsáveis pelas áreas do ambiente e das obras públicas, em relação à utilização destes resíduos, tais como (Decreto-Lei, n.º 46/2008):

- Agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos;
- Aterro e camada de leito de infraestruturas de transporte;
- Agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos;
- Misturas betuminosas a quente em central.

Assim, foram publicadas quatro especificações técnicas relacionadas com RCD pelo LNEC com o objetivo de tentar resolver as fundamentais necessidades dos operadores e agentes do sector relativamente à classificação e identificação dos RCD, ao seu processamento e armazenamento, às condições gerais de utilização dos RCD reciclados, propriedades e requisitos mínimos e regras de aplicação dos materiais, nomeadamente (APA, 2020):

- E 471 - Utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos;
- E 472 - Reciclagem de misturas betuminosas a quente em central;
- E 473 - Utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos;

- E 474 - Utilização de materiais reciclados provenientes de RCD em aterro e camada de leito de infraestruturas de transporte.
- E 483 - Utilização de agregados reciclados provenientes de misturas betuminosas recuperadas para camadas não ligadas de pavimentos rodoviários;
- E 484 - Utilização de materiais provenientes de RCD em caminhos rurais e florestais;
- E 485 - Utilização de materiais provenientes de RCD em preenchimento de valas.

2.3.2.METAS DE VALORIZAÇÃO DOS RCD

Os países da União Europeia até ao ano de 2020 deveriam ter alcançado uma meta de 70% em relação à reciclagem e valorização de RCD, de acordo com a Diretiva 2008/98/CE, publicada a 19 de Novembro.

Esta diretiva tem como objetivos principais a formação de condições legais para uma correta gestão de RCD, onde prevalecem a prevenção da produção e da perigosidade, o recurso à triagem na origem, à reciclagem e a outras formas de valorização, minimizando como consequência, o recurso à deposição em aterro e a utilização de recursos naturais, o que resultaria num crescimento do seu tempo de vida útil (Silva, 2016).

Na Tabela 2.6, apresentam-se os países da União Europeia que alcançaram os objetivos propostos pela Diretiva-Quadro sobre resíduos, particularmente a meta de valorização até ao ano 2011, nomeadamente (Alemanha, Dinamarca, Estónia, Holanda, Irlanda e Reino Unido).

A meta de valorização de 70% (em massa) dos RCD não perigosos alcançada deveu-se ao facto de serem cumpridos os seguintes fatores, que induzem a uma aceleração da reciclagem dos resíduos de construção e demolição (Vieira e Pereira, 2013):

- Ausência de matérias-primas;
- Adversidades na obtenção de terrenos para aterros;
- Medidas legais e económicas.

Tabela 2.6 - Valores estatísticos de produção e reciclagem/reutilização de RCD na União Europeia em 2011
(Vieira e Pereira, 2013)

Estado-Membro	Produção (milhões de toneladas)	% Reciclada ou Reutilizada	Meta de Valorização
Alemanha	72,40	86	✓
Austria	6,60	60	
Bélgica	11,02	68	
Bulgária	7,80	-	
Chipre	0,73	1	
Dinamarca	5,27	94	✓
Eslováquia	5,38	-	
Eslovénia	2,00	53	
Espanha	31,34	14	
Estónia	1,51	92	✓
Finlândia	5,21	26	
França	85,65	45	
Grécia	11,04	5	
Holanda	23,90	98	✓
Hungria	10,12	16	
Irlanda	2,54	80	✓
Itália	46,31	-	
Letónia	2,32	46	

Lituânia	3,45	60	
Luxemburgo	0,67	46	
Malta	0,80	-	
Polónia	38,19	28	
Portugal	11,42	5	
Reino Unido	99,10	75	✓
Roménia	21,71	-	
República	14,70	23	
Suécia	10,23	-	

De acordo com (APA, 2016), Portugal atingiu a meta em 2015 de valorização de 70 por cento de Resíduos de Construção e Demolição, aproximando-se assim, de uma construção mais sustentável.

2.4. RESPONSABILIDADE NA GESTÃO DE RCD

A gestão de resíduos consiste em todos os processos de recolha, transporte, armazenagem, tratamento, valorização e eliminação final, assim como a monitorização e o planeamento dessas operações.

O (Decreto-Lei, n. ° 46/2008) mencionado anteriormente, assegura uma corrente de responsabilidade que associa tanto os donos de obra, como empreiteiros e câmaras municipais. Os intervenientes no seu ciclo de vida, desde o produto original até ao resíduo produzido, são responsáveis pela gestão dos RCD.

Desta forma, mal sejam transmitidos os resíduos a um operador licenciado, a gestão do mesmo passa a ser da sua inteira responsabilidade. No entanto, caso os RCD sejam produzidos em obras particulares isentas de licença e não submetidas a comunicação prévia, a responsabilidade é atribuída aos municípios (APA, 2020).

2.4.1. GESTÃO DE RCD EM OBRAS PARTICULARES NÃO SUJEITAS A LICENCIAMENTO OU COMUNICAÇÃO PRÉVIA

- Ativar mecanismos que potenciem a sinergia com OGR (operações de gestão de resíduos) privados para a gestão dos RCD, minimizando a deposição ilegal de RCD;
- No âmbito dos contratos celebrados entre os municípios e os sistemas intermunicipais ou multimunicipais, de entrega e receção de resíduos urbanos, ser assegurado, igualmente, a receção e encaminhamento dos RCD produzidos na área de intervenção dos sistemas;
- Disponibilizar informação relativa à correta gestão de RCD, nomeadamente procedimentos a adotar;
- Disponibilização de equipamento para a deposição seletiva de RCD;
- Criação de pontos de recolha para tintas com a disponibilização de contentores, em diversos locais do concelho;
- Incentivar a utilização do Ecocentro;
- Desenvolver pequenos centros de receção de RCD mais próximos dos produtores de resíduos, contribuindo para a diminuição dos custos de transporte e incentivo para a sua correta deposição;
- Incentivar a incorporação de pelo menos 5% de materiais reciclados, à semelhança da obrigatoriedade prevista para as obras públicas (APA, 2019).

2.4.2.GESTÃO DE RCD EM OBRAS PARTICULARES (E PÚBLICAS) SUJEITAS A LICENCIAMENTO OU COMUNICAÇÃO PRÉVIA

- Exigir no ato do pedido de Licença de Construção a entrega da estimativa de produção de RCD, a indicação dos operadores (alvarás), seguindo o exemplo do PPGRCD (Planos de prevenção e gestão de resíduos de construção e demolição) requerido para as obras públicas;
- Condicionar a emissão da Licença de Utilização à apresentação do Registo de Dados de RCD, juntamente com o Livro de Obra, por forma a verificar-se o destino dos resíduos produzidos;
- Verificação efetiva do cumprimento da estimativa referida anteriormente antes da atribuição da Licença de Utilização, nomeadamente confirmar o encaminhamento dos resíduos para destino adequado, assim como aferir se as quantidades de RCD declaradas, nomeadamente através de e-GAR (guias eletrónicas de acompanhamento de resíduos), são as expetáveis para o tipo de obra em avaliação, no caso das obras públicas;
- Incorporar exigências de gestão de RCD nos Regulamentos Municipais prevendo e explicitando objetivamente as penalizações;
Harmonizar regulamentos municipais e incluir exigências de que os Cadernos de Encargos das obras passem a conter disposições obrigatórias sobre a gestão de RCD;
- Alerta/aconselhamento na escolha de materiais vs ciclo de vida e valorização, sugestão de métodos de construção/demolição/desconstrução;
- Facultar aos responsáveis pela gestão de RCD folheto informativo dos locais licenciados para a deposição dos resíduos, bem como as sanções do seu incumprimento;
- Criação de indicadores de produção de RCD;
- Entrega de manual de boas práticas no ato do licenciamento da obra;
- Incentivar a incorporação de pelo menos 5% de materiais reciclados, à semelhança da obrigatoriedade prevista para as obras públicas (APA, 2019).

2.4.2.1.LICENCIAMENTO DE OPERAÇÕES DE GESTÃO RCD

Com a entrada em vigor do (Decreto-Lei, n. ° 75/2015), de 11 de maio (diploma LUA), qualquer pedido de licenciamento para a atividade de tratamento de resíduos deverá ser realizado a partir do Módulo LUA que funciona através da plataforma eletrónica SILiAmb – Sistema Integrado de Licenciamento do Ambiente, que se encontra no portal da APA, constituído por um Simulador do Ambiente e que visa possibilitar a tramitação eletrónica de todos os pedido de licenciamento e autorização relativos a projetos e atividades abrangidas, entre outros, pelos Regimes de Resíduos (APA, 2020).

2.4.2.2.REUTILIZAÇÃO DE ROCHAS E SOLOS

De acordo com o Código LER (Lista Europeia de Resíduos), são considerados RCD os solos de escavação, contaminados ou não, rochas e lamas. Como não podem ser depositados em aterro, têm que ser reutilizados obrigatoriamente. Caso os solos de escavação sejam contaminados, devem ser tratados nos operadores licenciados para o efeito. Em contrapartida, as rochas e os solos sem qualquer tipo de contaminação nem substâncias perigosas, devem ser reutilizados (artigo 6.º do (Decreto-Lei, n. ° 46/2008)) (Costa, 2014):

- No trabalho de origem de construção, reconstrução, ampliação, alteração, reparação, conservação, reabilitação, limpeza e restauro e/ou na obra de origem;
- Recuperação paisagística e ambiental de explorações mineiras e de pedreiras;
- Como terras de cobertura em aterros destinados a resíduos;

- Em obras e locais sujeitos a licenciamento ou comunicação prévia pelas câmaras municipais.

2.4.2.3. TRIAGEM E FRAGMENTAÇÃO DE RCD

De acordo com o artigo 8.º do (Decreto-Lei, n.º 46/2008), de 12 de março, os RCD são obrigatoriamente objeto de triagem em obra com vista ao seu encaminhamento, por fluxos e fileiras de materiais, para reciclagem ou outras formas de valorização (Figura 2.5).

Ainda em conformidade com o mesmo artigo, é estabelecida uma hierarquia de gestão em obra que privilegia a reutilização em obra, seguida de triagem na obra de origem dos RCD cuja produção não é capaz de prevenir. Caso a triagem no local de produção dos resíduos se demonstre inviável, a triagem poderá realizar-se em local afeto à obra. Na base desta hierarquia, está o encaminhamento dos RCD para operadores licenciados para o efeito.

Importa ainda referir que o artigo 9.º do Decreto-Lei mencionado, estabelece ainda a obrigação de triagem previamente à deposição de RCD em aterro. Esta condição vinculativa pretende contribuir para um incremento da reciclagem ou de outras formas de valorização de RCD e, simultaneamente, para a minimização dos quantitativos depositados em aterro.



Figura 2.5 -Triagem e Valorização de RCD

Fonte: (Visa Consultores - Consultores de Geologia Aplicada e Engenharia do Ambiente)

2.4.2.4. TRANSPORTE

O transporte de resíduos encontra-se atualmente regulado pela (Portaria, n.º 28/2019) de 18 de janeiro, que sucede à Portaria n.º 145/2017 de 26 de abril e Portaria n.º 335/97 de 16 de maio, que havia instituído o uso obrigatório de guias de acompanhamento de resíduos (GAR). O Governo procedeu à desmaterialização das guias de acompanhamento de resíduos (GAR), anteriormente em formato de papel, criando, no quadro Programa Simplex + 2016, a Guia Eletrónica de Acompanhamento de Resíduos (e -GAR), o que, além de ter permitido substituir os antigos impressos em papel, criou as condições necessárias para a integração, de forma automática, dos dados de registo no Mapa Integrado de Registo de Resíduos (MIRR) e do Registo de Emissões e Transferências de Poluentes (PRTR).

A e-GAR torna o sistema de acompanhamento de transporte de resíduos mais fiável e simplifica o procedimento de registo e controlo de informação relativo a esta atividade (APA, 2020).

2.5.DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS

Além da resistência é importante que um material estrutural apresente durabilidade. Com a crescente utilização do betão no decorrer dos tempos, verificou-se que este envelhece, e que, por mais precaução que se tenha na sua composição, execução e cura, continua a ser importante ter em atenção o seu envelhecimento, realizando as devidas manutenções das estruturas. Na realidade o grau de degradação é influenciado pelo ambiente em que se encontra.

“Uma estrutura é considerada durável se durante a sua vida conserva os requisitos de projetos em termos de segurança, de funcionalidade e estética, sem custos de manutenção não previstos” (Coutinho, 2005).

Assim um betão só pode ser considerado durável se as estruturas que o contenham continuem a executar as funções a que estão destinadas, mantendo o desempenho e a sua resistência perante as forças a que estão sujeitas e também, suportem os processos de deterioração a que estarão expostas, durante a vida útil especificada ou tipicamente esperada. No entanto, uma estrutura durável não tem uma vida infinita, por isso, é imprescindível ir otimizando o desempenho das estruturas, não só procurando melhorar a qualidade dos materiais e modo de execução, mas também acompanhar todo o processo realizando manutenções de rotina (Neville, 1996).

Desta forma, para que seja otimizado o desempenho das estruturas, é necessário intervir na fase de projeto de estrutura e arquitetura, a nível de processos de execução em obra e ainda nos procedimentos de inspeção e manutenção (integrando a manutenção preventiva). De um modo geral, em termos de desempenho devem-se ter em conta os quatro fatores seguintes entre os principais, que influenciam a durabilidade e estão relacionados com as fases de projeto e execução (Coutinho, 2005):

- Projeto estrutural (particularmente pormenorização e cofragem);
- Materiais (particularmente betão e armaduras);
- Execução (particularmente desempenho dos colaboradores);
- Cura (particularmente humidade e calor).

Estes fatores afetam fortemente a qualidade da estrutura do betão pois definem a natureza e distribuição dos poros e, conseqüentemente, a maior ou menor influência dos mecanismos de transporte de substâncias nessa rede porosa. Esta influência leva a uma deterioração física, química e/ou biológica mais ou menos rápida do betão, tal como a corrosão de armaduras, ou seja, maior ou menor durabilidade da estrutura de betão.

2.5.1.FATORES QUE INFLUENCIAM A DURABILIDADE

É nas fases do processo construtivo: anteprojecto, projecto, construção, utilização e manutenção que as propriedades e principais características do betão, assim como a durabilidade, são afetadas por certos fatores. Na fase do anteprojecto, a localização e orientação em obra, onde o betão será aplicado, é essencial para a vida útil, uma vez que por exemplo, a posição do nível freático, a exposição a alterações bruscas de temperatura e a ventos que tenham atravessado zonas muito poluídas ou até o teor de sulfatos presente nos solos influenciam significativamente a durabilidade da estrutura. Posteriormente, na fase de projecto, quantificar as solicitações físico-mecânicas e químicas, bem como a composição do betão, são os fatores mais importantes que têm reflexo na durabilidade dos betões nesta etapa. As quantificações das solicitações mecânicas devem ter em conta as ações a que estará submetida a estrutura, a curto e longo prazo assim como em relação à previsão da evolução no tempo das solicitações químicas, que será mais difícil de estimar (Silva, 2016).

Alguns dos vários fatores que afetam a durabilidade e desempenho das estruturas de betão armado ou pré-esforçado estão mencionados de seguida (Aroso, 1991):

- Permeabilidade;
- Relação água/cimento;
- Transporte, colocação e compactação;
- Cura e proteção;
- Tipo e dosagem de ligante;
- Adições;
- Tipo e granulometria dos agregados;
- Meios e precauções a ter no fabrico do betão;
- Pessoal técnico;
- Exposição ambiental;
- Recobrimento das armaduras;
- Projeto e pormenorização;
- Controlo de qualidade a exercer.

Os critérios que influenciam a composição do betão encontram-se no próximo esquema (Figura 2.6):

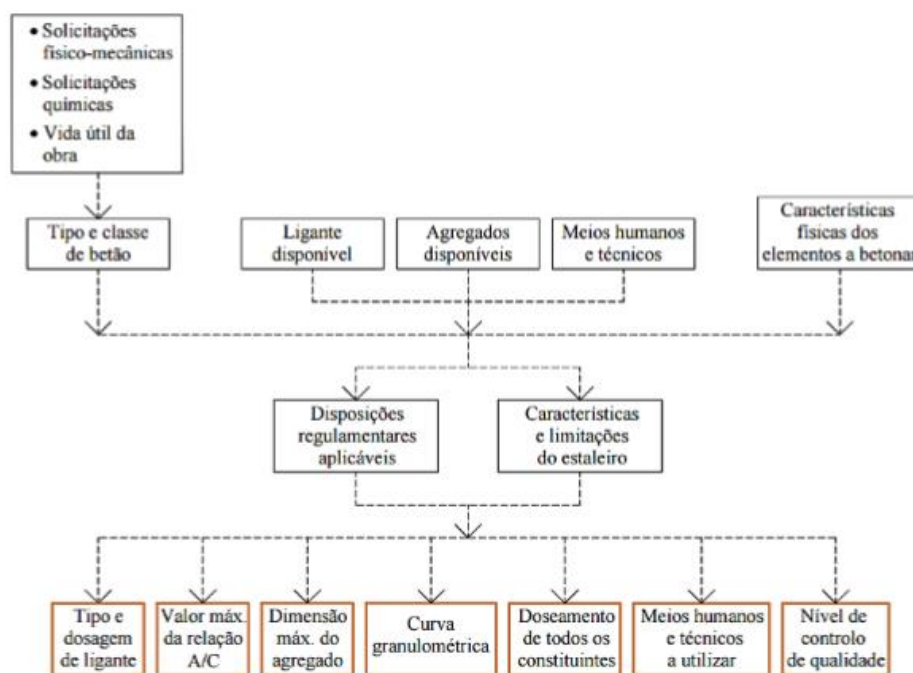


Figura 2.6 - Esquema para a determinação dos processos que condicionam a composição do betão

Fonte: (Aroso, 1991)

Posto isto, e mencionados os vários fatores que afetam a durabilidade do betão, deve-se ter em consideração que a deterioração do betão raramente é causada por apenas um dos motivos referenciados, e sim, por um conjunto deles. Desta forma, é muito difícil atribuir à deterioração um fator específico, já que o betão pode ser considerado satisfatório mesmo com alguns destes fatores a condicionarem a sua constituição (Neville, 1996).

2.5.2. INDICADORES DE DURABILIDADE NO DESEMPENHO DO BETÃO

É possível estimar o desempenho do betão e argamassas através de ensaios que simulam os processos de deterioração na realidade e ao longo do tempo, sendo possível estabelecer indicadores de durabilidade destes materiais. Os critérios de desempenho da durabilidade estão associados às propriedades da microestrutura, tanto da pasta de cimento endurecido, como dos agregados aplicados (Silva, 2016).

2.5.2.1. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

As resistências mecânicas são uma das propriedades mais importantes a nível de betão estrutural. Os resultados desta propriedade podem variar de acordo com o tipo de amostra, molde e cura, com a preparação da superfície final, rigidez do instrumento de teste, condições de amassadura, etc. Por isso, o ensaio deve ser realizado consoante um único padrão, sem afastamento dos procedimentos prescritos, de forma a que seja possível a comparação dos resultados obtidos (Neville, 1996).

2.5.2.2. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A resistividade elétrica é uma das propriedades do betão com a função de determinar a sua capacidade de resistir à passagem de corrente elétrica. As características do ambiente de exposição, sobretudo a humidade e as próprias condições intrínsecas do betão têm grande influência na resistividade elétrica.

Esta propriedade fornece-nos diversas indicações, especificamente, no que diz respeito à conectividade e à distribuição e diâmetros dos poros presentes na matriz do betão, ao conteúdo de humidade presente também nos poros do betão e à resistência do betão à penetração de substâncias líquidas ou gases, fatores fortemente associados à penetração de agentes agressivos no interior do betão e ao surgimento e desenvolvimento de diversas patologias que afetam a durabilidade das estruturas (Jesus, 2018).

Como a durabilidade do betão armado relaciona-se sobretudo com a corrosão de armaduras, é possível com o ensaio de resistividade elétrica avaliar a tendência da corrosão de armadura por exemplo devido à presença de iões de cloreto (CBECIMAT, 2014).

Os fatores que influenciam a resistividade elétrica no betão são apresentados de seguida (Jesus, 2018):

- Características dos materiais (relação água/cimento, tipo e quantidade de agregados, dosagem de cimento, utilização de adições minerais ou adjuvantes e grau de hidratação do cimento);
- Características ambientais (temperatura e humidade relativa);
- Características dos elementos estruturais (presença de armadura e recobrimentos);
- Ação dos agentes agressivos (Penetração de iões de cloreto e carbonatação).

Os resultados do ensaio de resistividade elétrica indicam-nos que as estruturas de betão armado que apresentem maiores valores de resistividade elétrica são mais duráveis do que as de valores mais baixos, sendo que neste último apresentarão uma grande propensão para a penetração de cloretos e posterior corrosão das armaduras, ou seja, uma maior suscetibilidade aos agentes agressivos externos (Jesus, 2018).

2.5.2.3. REAÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA (ASR)

A reação álcali-silica é um tipo de reação álcali-agregado, e também, uma das causas comuns no que toca à degradação do betão, ocorrendo no interior do mesmo e originando a sua fissuração, devido à formação de produtos expansivos. Esta reação ocorre quando formas de sílica potencialmente reativas

reagem com os álcalis presentes no cimento, originando um gel sílico-alcálico, que expande na presença de humidade (Esteves, 2017). Como o gel sílico-alcálico absorve a humidade e expande, exercendo pressões hidráulicas cada vez maiores, causando microfissuras tanto nos agregados como na pasta de cimento. O movimento do gel ocorre devido à sua fluidez, penetrando no agregado através da rede porosa ou de fissuras (Iskhakov, Timothy e Meschke, 2019).

Para a prevenção destas reações, deve-se seleccionar os agregados para o fabrico de betão que não sejam reativos aos álcalis, e assim, a sua utilização permitirá um aumento no tempo de vida útil das estruturas.

Os agregados seleccionados poderão ser de natureza diversa, à excepção de rochas vulcânicas, que poderão ser utilizadas mediante uma análise/estudo quanto à sua reatividade e identificando quais as formas de sílica que contêm, antes de as incorporar no betão (Esteves, 2017).

2.5.2.4.RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS

As reações químicas de substâncias agressivas com alguns compostos do betão endurecido, em certas condições, também são responsáveis pela sua deterioração e, consequentemente afetam a durabilidade. Normalmente, as substâncias agressivas provêm do meio ambiente e são transportadas para a parte interior do betão direccionando-se às substâncias com que reagem. Para que se verifiquem as reações, é indispensável a existência de água, no estado líquido ou gasoso e a temperatura contribui para a velocidade das reações, facilitando a movimentação dos iões e moléculas dos reagentes. Outras condições que influenciam este processo são o grau passivante dos produtos da reacção e a permeabilidade do betão, uma vez que facilitam o acesso, acelerando a velocidade com que as substâncias agressivas penetram para o interior do betão. Entre as reações mais importantes que conduzem à deterioração do betão, inclui-se o ataque por sulfatos.

O ataque por sulfatos ocorre porque o ião sulfato ataca os aluminatos do Cimento Portland ou do cimento com clínquer Portland, originando um pouco de gesso e maioritariamente etringite, que em caso de presença suficiente de água torna-se uma reacção demasiado expansiva, podendo alcançar um aumento de duas vezes e meia em relação ao volume inicial. A formação de etringite anula-se para os 80 °C e aumenta até aos 0 °C (o seu máximo), por isso em países quentes é uma reacção lenta. Para protecção deste tipo de reacções no betão é necessário ter em atenção (Coutinho, 2005):

- A escolha do tipo de cimento de modo a reduzir a reatividade;
- Grau de impermeabilidade (baixa razão água/cimento).

2.5.2.5.PENETRAÇÃO DE CLORETOS

A presença de cloretos é também, uma das principais causas responsáveis pela deterioração de betão armado e pré-esforçado, pois a sua aproximação às armaduras é influenciada, na maior parte dos casos, pela permeabilidade da camada de recobrimento (Coutinho, 2005).

A penetração processa-se através da estrutura porosa do betão, sobretudo por intermédio da rede contínua de poros capilares da pasta de cimento e também pelas fendas e microfendas existentes. Os mecanismos de transporte, pelos quais pode ocorrer penetração de cloretos são a permeação, absorção capilar e difusão e, somente as condições de exposição, o teor de humidade, dimensão e continuidade da estrutura porosa é que podem determinar a relevância de cada um dos mecanismos de transporte (Costa e Appleton, 1999).

Uma das principais causas de corrosão no betão armado é a penetração de cloretos, onde os iões cloreto que atravessam o betão e atingem a armadura com uma concentração superior ao teor crítico em cloretos,

originam uma dissolução da película passiva, que com a combinação de oxigénio e humidade suficientes provocam a corrosão do aço (Pinto, 2013).

2.5.2.6. ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

A presença de água e o transporte através dos poros e fendas (dessa água, substâncias nela dissolvidas e gases) são os dois aspetos fundamentais, no que toca a processos físicos e químicos que afetam a durabilidade do betão e que, consequentemente, alimentam o processo corrosivo das armaduras.

Relativamente à cinética de absorção, é a organização dos poros de acordo com o seu tamanho, que indiscutivelmente influencia a velocidade de transporte dos líquidos e gases na rede porosa. Em geral estudam-se estes fenómenos a partir da análise de curvas de absorção capilar determinadas em ensaios de absorção capilar, onde apenas uma face do provete previamente seco é imergido em água poucos milímetros e, a partir daí, medido o aumento de peso em função da raiz do tempo decorrido desde o início do ensaio (Coutinho, 2005).

2.5.2.7. CARBONATAÇÃO

A carbonatação é também uma das reações químicas que afetam a durabilidade, ameaçando as armaduras (betão armado ou pré-esforçado). Esta reação ocorre quando os compostos cálcicos do betão (provenientes da hidratação do cimento), mais precisamente o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), reagem com o dióxido de carbono (CO_2). O dióxido de carbono entra através dos poros para ao interior do betão reagindo assim, com o hidróxido de cálcio, originando carbonato de cálcio (CaCO_3) que, como possui um pH baixo altera o pH do betão, podendo descer de 12,5 para menos de 9. Como o dióxido de carbono do ar penetra o betão da superfície para o interior do mesmo através dos poros, a carbonatação só é possível se os poros contiverem ar e será tanto maior quanto mais permeável o betão (quantidade de poros).

Assim, quando a frente de carbonatação atinge as armaduras, originará a desp passivação das mesmas (até ao momento passivas) e a sua eventual corrosão (Coutinho, 2005).

Em suma, os principais fatores que afetam de forma significativa a velocidade de carbonatação são (Silva, 2016):

- A permeabilidade do betão;
- O teor de hidróxido de cálcio;
- A concentração de dióxido de carbono;
- As condições de exposição.

2.6. UTILIZAÇÃO DE ADIÇÕES

O betão é o material de construção mais utilizado devido à sua versatilidade, economia, disponibilidade de matérias-primas, resistência e durabilidade. Este material é utilizado com o intuito de suportar as mais severas condições ambientais e assumir as formas mais inspiradoras e imagináveis. Vários engenheiros, cientistas e investigadores estudam e pesquisam continuamente para obterem as melhores características do betão, principalmente do ponto de vista da resistência e durabilidade, com a ajuda de adjuvantes inovadores e adições pozolânicas ativas ou não ativas. Para além disso, o uso de adições economiza energia e possui benefícios ambientais devido à redução da emissão de dióxido de carbono causado pela fabricação de cimento Portland. Tem sido realizado um esforço em termos ambientais, de

modo a utilizar resíduos e subprodutos como adições para betão permitindo estratégias amigas do ambiente, eliminando grandes quantidades de materiais que poderiam poluir o planeta, água e o ar. Alguns exemplos de subprodutos são: cinza volantes, sílica de fumo, escória de alto forno, cinza de casca de arroz e pozolanas naturais que podem ser usadas como adição em betão ou como substituição parcial do cimento. Assim, as adições são usadas frequentemente em misturas para betão com o objetivo de reduzir a quantidade de cimento, melhorar a trabalhabilidade, aumentar a resistência e também a durabilidade (Siddique e Khan, 2011).

Um benefício muito importante no uso de adições e relacionado com a durabilidade do betão armado ou pré-esforçado é que com certas adições pode-se conferir uma maior resistência a algumas agressões químicas, já que ao hidratarem, consomem hidróxido de cálcio, reduzindo o risco de formação de etringite (que resulta da combinação dos sulfatos com a alumina do cimento ou do agregado na presença de hidróxido de cálcio e água). Por outro lado, também pode ser minimizado o risco de ataque dos álcalis à sílica reativa do agregado, pois ocorre de igual forma na presença de hidróxido de cálcio.

Por conseguinte, no que se refere à corrosão das armaduras, a presença deste tipo de materiais minerais no betão conduzem, geralmente, a aumentos significativos da trabalhabilidade e durabilidade do betão (Coutinho, 2011).

2.7. EXPERIÊNCIAS COM RCD

De seguida apresentam-se alguns estudos que contribuem para o conhecimento referente à utilização de resíduos de construção e demolição na construção de forma a contribuir para uma construção sustentável e consequentemente para a economia circular.

Na dissertação de (Rocha, 2016) foi possível concluir que argamassas com menos substituição e contendo mais finos atingiram melhores resultados, ou seja, a finura é um fator muito importante e determinante para a eficiência dos resíduos de construção e demolição nestas circunstâncias. Relativamente aos ensaios, apenas na reação álcalis-sílica se obtiveram melhores desempenhos comparativamente ao controlo.

De acordo com o trabalho de (Pereira, 2015) a substituição parcial de cimento por RCD fino permitiu uma ligeira melhoria da trabalhabilidade, sem ser necessário o uso de adjuvantes. Por outro lado, no que toca às características de durabilidade, apresentou desempenhos positivos no que concerne ao ataque por cloretos e expansão ASR. Este resíduo poderá ser utilizado como substituto parcial do cimento Portland em pequenas percentagens levando a uma perda marginal de resistência, mas com um aumento de durabilidade.

No estudo realizado por (Silva, 2016), onde se produziram argamassas de controlo e com 10% de substituição do cimento Portland por RCD finamente moído, verificou-se que o uso destes resíduos não conduziu a modificações significativas na trabalhabilidade das argamassas, pelo que não foi necessário o uso de adjuvantes. Embora a substituição de cimento por 10% de RCD tenha levado a alguma perda de resistência, até 15% conforme a idade, a resistência à reação álcalis sílica, a resistência à penetração de cloretos e a absorção de água por capilaridade apresentaram melhores resultados do que as argamassas de controlo.

No artigo de (Leite e Santana, 2019) o método de mistura do agregado reciclado (TSMA – método de mistura em duas etapas) foi satisfatório na produção de betão, melhorando a trabalhabilidade e as características do betão endurecido. O aumento da proporção dos finos provocou uma diminuição na resistência à compressão e à abrasão, sendo que esta diminuição foi menor para o valor mais elevado das relações agregado/cimento e água/cimento. O efeito da finura verificou-se ser positivo, porque para

além de compensar o baixo teor de cimento na mistura fez com que o betão apresentasse textura mais irregular e áspera melhorando a zona de transição pasta/agregado reciclado, devido à melhor adesão matriz/agregado.

Segundo (Brito et al., 2019), a construção de pavimentos em betão tem sido considerada uma boa alternativa para alguns agregados reciclados grossos, devido aos resultados comparativos entre as características específicas do agregado reciclado (RA) e o agregado natural (NA). Por isso, alguns centros de pesquisa e administrações públicas mostraram o seu interesse e iniciaram-se a partir da década de 1970, várias aplicações de estradas em escala real, com RA, incluindo camadas de base e sub-base não ligadas ou ligadas hidraulicamente e aterros.

Várias agências de transporte, tais como a Administração Federal Rodoviária dos EUA, mostraram que o betão com agregados reciclados (RAC) pode ser usado em infra-estruturas rodoviárias e que a maioria dos pavimentos construídos com RAC apresenta bom desempenho (Verian et al., 2013). No entanto, alguns demonstraram problemas associados ao aumento da retração, deformações térmicas, fissuração e maior suscetibilidade ao gelo/degelo, principalmente devido à qualidade do RAC (Kumar, 2017).

Como são aplicadas cargas dinâmicas no betão utilizado na construção de pavimentos rígidos, devido ao constante movimento do trânsito, é necessário este possuir propriedades mecânicas e de durabilidade adequadas. A deterioração das superfícies de betão ocorrem devido a várias formas de desgaste, como erosão, abrasão e movimento relativo entre a superfície e o movimento do trânsito. Uma das propriedades que afeta a resistência à abrasão do betão é o tipo de agregado e, portanto, podem surgir algumas questões específicas com o uso da RA, já que, é conhecido que estes agregados apresentam tipicamente maior instabilidade que a NA. No entanto, segundo (Kumar, 2017), os pavimentos rígidos contendo RAC podem demonstrar vantagens no que toca aos pneus, uma vez que em contacto com este tipo de pavimento apresentaram um menor desgaste.

O uso de RAC também é compatível com o uso de outros resíduos, tais como agregados de borracha de pneus moídos no fim da vida útil, que têm ganho ampla atenção entre pesquisadores de todo o mundo (Brito et al., 2019; Verian et al., 2013). Desta forma, embora possam causar uma diminuição no desempenho mecânico de pavimentos rígidos, também foi observado que a resistência ao gelo/degelo podem apresentar melhorias, provavelmente devido ao sistema de vazios na matriz do betão com a borracha (Thomas e Gupta, 2016). As partículas de borracha podem controlar o início e a propagação de fissuras (Turatsinze et al., 2005).

No que se refere à produção de elementos de betão não-estruturais na construção de estradas, como lancis, pavimentação e barreiras, o uso de RA é considerada uma aplicação particularmente interessante, pois, como esse tipo de betão normalmente oferece uma resistência à compressão média entre 20 e 25 MPa, os RA podem ser incorporados em grandes quantidades sem um controlo de qualidade tão rigoroso quanto para elementos estruturais (López-Uceda et al., 2016).

Segundo o Centro de Tecnologia de Pavimentação e Transporte da Universidade de Waterloo ((Irati et al., 2013) foi avaliado o desempenho a longo prazo de quatro seções teste de pavimento de betão com diferentes percentagens de RAC (0%, 15%, 30% e 50 %). A pista teste era de larga escala, com 1,294 m de comprimento e 8 m de largura, construída em 2007. As seções foram sucessivamente equipadas com extensómetros e extensómetros de cabos de vibração, o que permitiu conhecer a resposta do pavimento ao longo do tempo. Após 5 anos de serviço, foi observado um desempenho semelhante em todas as seções teste, tendo-se verificado que o aumento do conteúdo de RAC não afetou visivelmente o desempenho do pavimento (Brito et al., 2019).

Noutro estudo (Sadati e Khayat, 2016), o betão antigo, disponível na área do Aeroporto Internacional Lambert em St. Louis, Missouri, foi triturado e separado em RAC fino e grosso. Após este procedimento, utilizou-se para construir uma seção de pavimento experimental de 300 m de comprimento, consistindo numa faixa de rodagem de 3,6 m de largura, umas ilhas de betão de 3 m de largura (no meio das faixas) e uma vala de 150 mm de largura. Os painéis de pavimento eram de 3,6 m por 34,5 m ao longo da faixa de rodagem. Foram testadas duas misturas com 30% e 40% de RAC grosso. Não foram observados sinais de queda, nem problemas de colocação, acabamento das misturas produzidas com RCA no local da obra. A incorporação de 30% e 40% de RCA reduziu a resistência à compressão aos 91 dias em 7% e 12%, respetivamente. O controlo e a mistura com 30% de RAC apresentaram desempenho semelhante de retração e permeabilidade aos cloretos. Todas as misturas apresentaram boa resistência ao gelo e degelo com fatores de durabilidade superiores a 87%. Não foi observada nenhuma diferença significativa na deformação das várias misturas (Brito et al., 2019).

Outro exemplo de aplicação estudado por (Grubl, Nealen e Schmidt, 1999) foi o edifício 'Waldspirale' (Figura 2.7), projetado por Friedensreich Hundertwassers e localizado em Darmstadt, Alemanha. Contém 12 andares, 105 apartamentos, garagem, quiosque, café e bar. O pátio interior tem um parque infantil para crianças e um pequeno lago artificial. O telhado inclinado tem arbustos, relva, flores e árvores. Cada janela do Waldspirale, cujo número é superior a 1000, é única, da mesma forma que as maçanetas das portas de cada apartamento. O projeto Waldspirale foi construído usando agregado reciclado de betão e, devido aos problemas que ocorrem ao usar o RA com absorção de água relativamente alta, desenvolveu-se e implementou-se um método controlado por consistência. O objetivo deste método de produção era reduzir o desvio padrão da resistência à compressão, mantendo uma consistência inicial constante para cada mistura de betão. Durante a fase de construção do Waldspirale, a curva de classificação de todas as frações dos agregados permaneceu dentro de limites toleráveis. Os resultados da resistência à compressão nos testes mostram que todas as misturas de betão atingiram a sua classe de resistência padrão ou até se saíram melhor do que o esperado. O valor médio da resistência à compressão foi de 52,3 MPa, muito superior ao necessário. Decidiu-se, portanto, aumentar a trabalhabilidade adicionando água extra, o que reduziu o valor médio para 42,3 MPa. Além disso, foi relatado que o RAC não mostrou diferenças significativas comparativamente ao betão com NA (Brito et al., 2019).



Figura 2.7 - O edifício "Waldspirale" de apartamentos, localizado em Darmstadt, Alemanha

Fonte: (Grubl, Nealen e Schmidt, 1999)

No centro de Zukunftspark Wohlgelegen, em Heilbronn, foi construído em 2012 o Wissenschafts-und Technologiezentrum (WTZ- Centro de Ciência e Tecnologia) (ver Figura 2.8) (Beton, 2018). Dois dos

seus edifícios WTZ I E WTZ 2 abrigam empresas inovadoras no campo de tecnologia médica e ambiental, bem como escritórios e laboratórios. Cada edifício possui 5 andares (incluindo cave) com áreas uteis de cerca de 1900 m² e 2400 m², respetivamente, tendo sido necessária uma produção de betão de 1250 m³ para o primeiro edifício e 1400 m³ para o segundo. Todas as misturas de betão continham 18% a 20% de agregado grosso reciclado dependendo da sua função como elemento estrutural. Para as lajes utilizou-se uma mistura com betão de classe de resistência C25/30 e 30/37 e de classe ambiental XC3/XA1/XF1, enquanto para pilares e lajes em áreas exteriores utilizaram-se misturas com a classe de resistência anterior, mas de classe ambiental XC4 devido ao aumento da exposição de dióxido de carbono no exterior. Não foram verificadas alterações no seu estado comparativamente ao uso de betão com NA (Silva, Brito e Dhir, 2019).



Figura 2.8 - Centro de Ciência e Tecnologia em Heilbronn, Alemanha

Fonte: (Silva, Brito e Dhir, 2019)

2.7.1. OUTRAS APLICAÇÕES

Em estudos referentes à aplicação de resíduos de construção e demolição em estruturas reforçadas com geossintéticos, no projeto de investigação RCD-VALOR (FEUP, 2012), verificou-se que no decorrer das atividades de demolição e reciclagem é imprescindível remover as impurezas, presentes nos diferentes lotes de resíduos de construção e demolição para que sejam cumpridos os requisitos impostos pela especificação E-474 do LNEC para o material reciclado.

Também se constatou que a resistência das interfaces entre geossintéticos e RCD estava entre os valores expectáveis quando se utilizam solos como material de aterro, o que é fundamental para o bom funcionamento dos RCD em aterros, quer em movimento de corte direto, quer em arranque. Quanto aos ensaios de lixiviação, sob o ponto de vista ambiental, o uso destes resíduos não apresenta adversidades e, relativamente a efeitos de danificação e degradação causados pelos RCD, conclui-se com base em estudos efetuados em campo que são pouco significativos (Vieira e Pereira, 2015).

Em suma, o uso de resíduos de construção e demolição envolve cada vez mais pesquisas e estudos sobretudo pela repercussão a nível ambiental. No entanto, após a análise dos estudos já existentes foi possível verificar que a sua utilização não apresenta grandes problemas acrescidos comparados com o uso de agregados naturais e contrariamente, poderão ser benéficos a nível ambiental e económico. Na Tabela 2.7 apresentam-se alguns destinos dos materiais que compõem os RCD (Silva, 2016):

Tabela 2.7 - Destino/Aplicações dos vários Resíduos de Construção e Demolição (Silva, 2016)

Materiais	Descrição	Destino
Betão	Triturado, resultante de demolições	Material de aterro, base de enchimento para valas de tubagens e pisos térreos de edifícios
	Triturado e crivado com poucas ou nenhuma impurezas	Sub-base na construção de estradas, agregado reciclado para o fabrico de betão e base de enchimento para sistemas de drenagem
	Triturado e crivado, limpo de impurezas e com menos de 5% de tijolo	Construção de estradas, produção de betão, material de aterro estrutural e base de enchimento para valas de tubagens
Betão (conforme o grau de granulometria)	Elemento demolido	Material de aterro e pavimentos
	Fragmentado (de 200- 400 mm)	Proteção de diques
	Britado (menos de 50 mm)	Sub-base, enchimento, material de fundação
	Britado e desgastado (menos de 40 mm)	Agregado de betão, agregado de betão betuminoso para sub-base, enchimento
	Pó (subproduto da britagem)	Ligante para betão betuminoso, material de estabilização de solos
	Finos após britagem e crivagem (fração dos 0 aos 4 mm)	Incorporação na construção de estradas substituindo a areia, ou em argamassas, devido às suas propriedades pozolânicas (NOTA: baixo potencial de reciclagem)
Alvenarias	Tijolos	Agregados para betão, agregados para produção de peças pré-fabricadas de betão, agregados para tijolos de silicato de cálcio, material de enchimento para valas e tubagens, material de enchimento e estabilização de caminhos rurais; revestimento de campos de ténis
	Azulejos	Material de enchimento
	Pedra	Reutilização direta, conservação e restauro
Madeiras		Mobiliários, soalhos, portas, caixilhos de janelas, estacas para plantas, reparação de edifícios rurais, material de enchimento para a correção de taludes, incineração com recuperação de calor para pirólise, para a compostagem e para a produção de

		combustível derivado dos refugos
Metais	Alumínio	Sucata e fabrico de novos elementos
	Aço e Ferro	Reutilização direta
Vidro		Produção de novo vidro e construção de estradas
Plásticos		Incineração com recuperação energética, reciclagem por processamento mecânico (nem todos os plásticos), utilização na reciclagem de fontes energéticas (como o petróleo bruto e o gás natural)
Materiais de isolamento		Pirólise, moldagem de tijolos artificiais, espalhamento sobre o produto não curado (depois da espuma estar separadas em fibras simples), incineração
Materiais de construção com gesso		Integração em placas para tetos e pavimentos, no cimento expansivo e no material de enchimento em obras de estradas e caminhos-de-ferro
Resíduos perigosos recicláveis	Óleos	Transformação em combustível ou refinados para a produção de novo óleo
	Pilhas, baterias recarregáveis e produtos abrasivos	Material de enchimento em estradas e caminhos- de-ferro
Pavimentos	Asfálticos	Construção e manutenção de estradas como pavimento asfáltico ou agregados para bases e sub-bases, agregados para bermas e camadas drenantes e em pavimentos estabilizados
	De betão	Construção e reabilitação de estradas como agregados para betão, agregados em pavimentos asfálticos, material para bases de taludes e agregados não ligados para bases de estradas
Solos		Terra arável, aterros de estradas, integração paisagística (minas e pedreiras) e acerto topográfico
Papel e cartão		Produção de cartão, combustível para incineração, isolamentos com celulose

3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo tem como objetivo avaliar as potencialidades da utilização de RCD como substituição total da areia normalizada CEN e parcial do cimento Portland para uso em betão. Para isso, realizou-se um programa experimental, descrito neste capítulo, com a finalidade de estudar algumas propriedades de argamassas contendo diferentes composições, ou seja, argamassas de controlo (CTL1 e CTL2) com 100% de cimento e de areia CEN, argamassas com 100% de substituição de areia CEN por agregado fino de RCD (CDWs), argamassas com substituição de 5% do cimento Portland por finos obtidos da moagem de agregado fino de RCD (5CDWa) e argamassas com ambas as substituições (CDWs+5CDWa).

Assim, numa fase preliminar procedeu-se à caracterização das amostras de CDWs, CDWa e cimento quanto às sua granulometrias, massas volúmicas e superfícies específicas.

Posteriormente realizaram-se os ensaios com argamassas, constituídas pelos seguintes materiais:

- Cimento CEM I 42,5 R fornecido pela SECIL;
- Areia normalizada CEN;
- Água destilada;
- Superplastificante Sika ViscoCrete 20HE;
- Agregado fino de RCD (CDWs) e agregado fino moído de RCD (CDWa) fornecido pela empresa RCD - Resíduos de Construção e Demolição SA.

Os ensaios realizados sobre as argamassas foram os seguintes:

- Avaliação da trabalhabilidade;
- Resistências mecânicas;
- Determinação da resistência à carbonatação;
- Absorção de água por capilaridade ;
- Penetração acelerada de cloretos;
- Resistividade;
- Reação álcalis-sílica;
- Resistência ao ataque por sulfatos.

No final de cada ensaio apresentam-se os resultados obtidos acompanhados pelos seus desempenhos face às argamassas de referência.

3.1.1.AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Neste capítulo, para além do estudo das diversas propriedades associadas às argamassas e aos materiais utilizados, também são apresentados os resultados obtidos para cada tipo comparativamente com os de controlo. Para isso, recorre-se ao cálculo do desempenho, através da seguinte expressão:

$$Desempenho (\%) = \frac{|x - x_{CTL}|}{x_{CTL}} * 100$$

3.1

Sendo:

X o resultado da propriedade X para a argamassa com substituição por RCD.

X_{CTL} a média do resultado da propriedade X para as argamassas de controlo.

O melhor ou pior comportamento do material comparativamente com a argamassa de controlo foi representado com o sinal positivo e negativo, respetivamente.

3.2.MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1.CIMENTO

O tipo de cimento empregue foi o CEM I 42,5 R, proveniente da SECIL. A escolha deste cimento deveu-se ao facto de ser constituído sobretudo por clínquer (95% a 100%), pouco ecológico.

Relativamente às propriedades físicas, mecânicas, composição química e mineralógica deste cimento, os resultados do controlo estatístico representam-se nas próximas tabelas (Tabela 3.1, Tabela 3.2, Tabela 3.3 e Tabela 3.4), fornecidas pela Secil:

Tabela 3.1 - Ensaio Mecânicos (NP EN 196-1 2017) (Secil)

Idade	Resistência à Flexão (MPa)		Resistência à Compressão (MPa)	
	Mês	Ano	Mês	Ano
2 dias	6,0	5,6	33,4	31,1
7 dias	8,1	7,6	46,8	47,5
28 dias	8,9	8,7	58,4	58,3

Tabela 3.2 - Ensaio Físicos (Secil)

	Mês	Ano
Peso específico (g/cm³)	3,10	3,12
Resíduo de peneiração (%) (NP EN 196-6)	45 µm	3,0
	32 µm	8,1
Superfície específica de Blaine (cm²/g)	4121	3739

(NP EN 196-6)			
Água na pasta normal (%)		28,8	28,5
(NP EN 196-3)			
Tempo de presa (min) (NP EN 196-3)	Início	156	181
	Fim	222	248
Expansibilidade (mm) (NP EN 196-3)		1	1
Índice de Reflectância – Y (0 a 100)		27	26

Tabela 3.3 - Análise Química (Secil)

	Mês	Ano
Perda ao fogo (%)	2,47	2,28
Resíduo Insolúvel (%)	1,36	1,03
Óxido de Silício - SiO₂ (%)	20,37	20,33
Óxido de Alumínio - Al₂O₃ (%)	4,82	4,83
Óxido de Ferro - Fe₂O₃ (%)	2,82	3,02
Óxido de Cálcio - CaO (%)	62,92	63,31
Óxido de Magnésio - MgO (%)	1,81	1,91
Sulfatos - SO₃ (%)	3,10	2,85
Óxido de Potássio - K₂O (%)	0,75	0,73
Óxido de Sódio - Na₂O (%)	0,17	0,20
Cloretos - Cl- (%)	0,05	0,05
Cal Livre (%)	1,48	0,96

Tabela 3.4 - Análise Mineralógica (Secil)

	Mês	Ano
Silicato Tricálcico (%) - C₃S	62,9	61,3
Silicato Bicálcico (%) - C₂S	12,5	13,0
Aluminato Tricálcico (%) - C₃A	4,1	4,4
Ferro-aluminato Tetracálcico (%) - C₄AF	9,8	10,5

A distribuição granulométrica deste cimento foi obtida em granulómetro laser do LEMC e encontra-se representada na Figura 3.1:

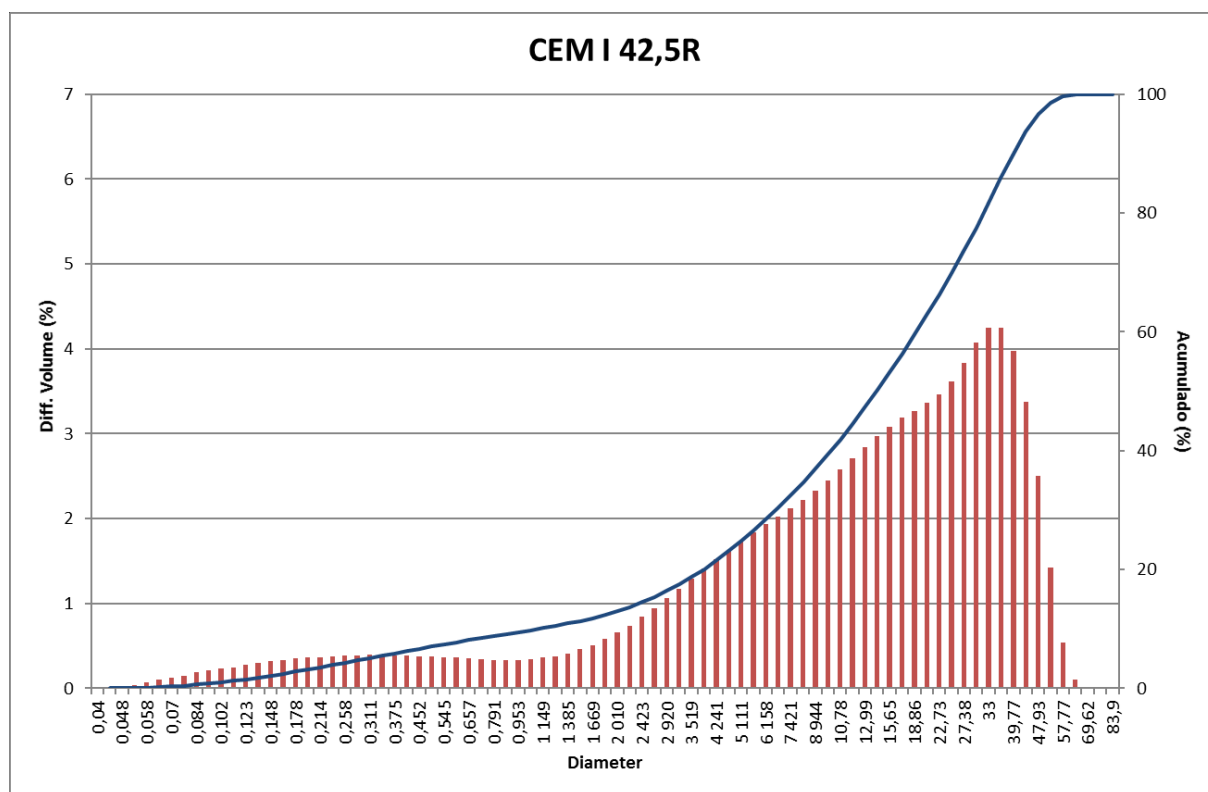


Figura 3.1 - Curva granulométrica laser do CEM I 42,5 R

3.2.2. AREIA NORMALIZADA CEN

Tendo como referencia a norma (NP EN 196-1 2017) foi utilizada uma areia normalizada CEN (Figura 3.2), ou seja, uma areia siliciosa natural, com teor em sílica de 98% e constituída por partículas/grãos redondos.



Figura 3.2 - Areia normalizada CEN

Segundo a norma referida anteriormente (NP EN 196-1 2017), a composição granulométrica da areia CEN, corresponde à Tabela 3.5:

Tabela 3.5 - Composição granulométrica da areia normalizada CEN ((NP EN 196-1 2017))

Abertura dos peneiros (mm)	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Resíduos acumulados (%)	0	7 ± 5	33 ± 5	67 ± 5	87 ± 5	99 ± 1

Foram escolhidos aleatoriamente 3 sacos de areia CEN existente em laboratório e determinada a sua granulometria. O processo consistiu na peneiração mecânica completada por peneiração manual de acordo com (NP EN 933-1 2014) (Figura 3.3 e Figura 3.4).



Figura 3.3 - Peneiração mecânica para determinar análise granulométrica da areia CEN

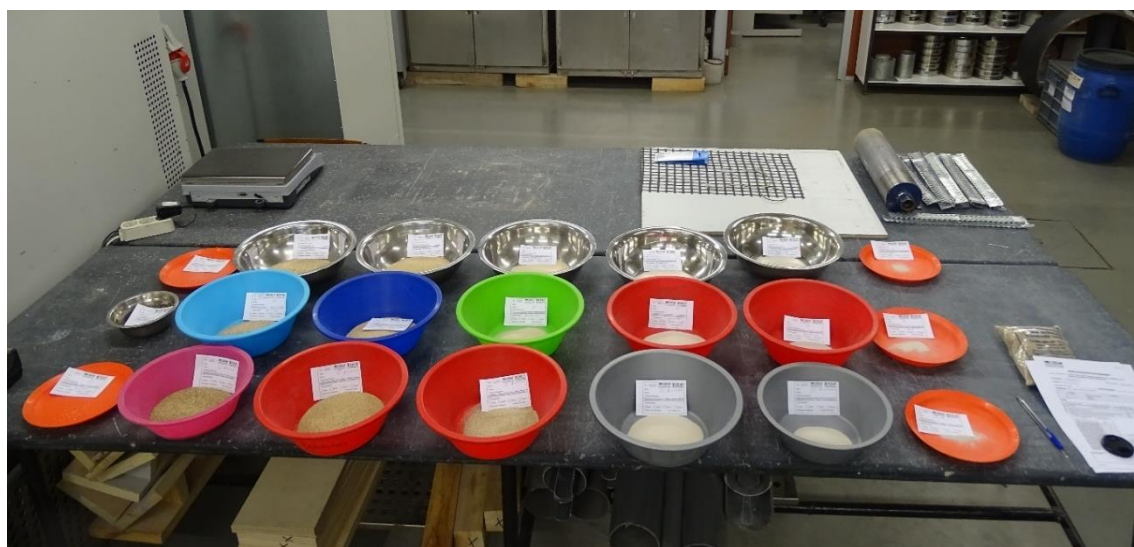


Figura 3.4 - Massa retida em cada peneiro relativamente aos 3 sacos de areia CEN

Na Tabela 3.6 encontram-se os resultados da Massa retida (Ri), Percentagem retida e Percentagem retida acumulada e na Figura 3.5 a sua curva granulométrica.

Tabela 3.6 - Composição granulométrica média das amostras de areia normalizada CEN no LEMC

Abertura dos peneiros (mm)	Massa retida (Ri) (g)	Percentagem retida (%)	Percentagem retida acumulada (%)
2	0	0	0
1	469,8	34,8	34,8
0,5	447,8	33,2	68,0
0,25	106,2	7,9	75,8
0,125	234,9	17,4	93,2
0,063	90	6,7	99,9
P	1,4	0,1	100,0
Total	1350	100	

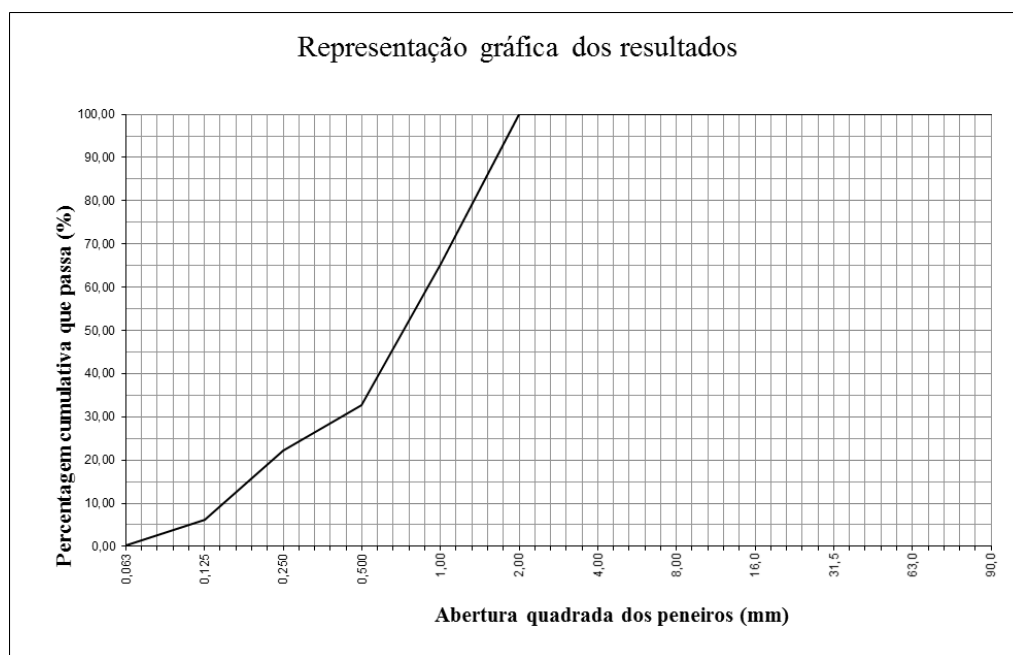


Figura 3.5 - Curva granulométrica da areia normalizada CEN

3.2.3. ÁGUA

De acordo com a (NP EN 196-1 2017) deve ser usada água destilada ou desionizada para os ensaios e testes de validação. Neste caso de estudo foi utilizada água destilada a temperatura ambiente para as argamassas ensaiadas.

3.2.4.SUPERPLASTIFICANTE

O superplastificante/adjuvante usado neste estudo foi o Sika ViscoCrete 20HE, que segundo a sua ficha técnica é de alto desempenho para betão e argamassas onde é requerido um rápido desenvolvimento das resistências iniciais, forte redução da água de amassadura e elevada fluidez.

Relativamente à dosagem utilizada, este produto especifica que para trabalhabilidade média utiliza-se 0,2 a 0,8% em relação à massa do cimento. Para trabalhabilidade elevada e para betão autocompactável a Sika aconselha a utilizar 1,0 a 2,0% relativamente à massa do cimento.

3.2.5.RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

3.2.5.1.ORIGEM DA AMOSTRA

Os resíduos de Construção e Demolição (RCD) utilizados, são provenientes de uma unidade industrial denominada por RCD - Resíduos de Construção e Demolição SA, que se localiza na Figueira da Foz, e tem como objetivo a gestão e tratamento de resíduos.

Nesta empresa os resíduos de construção e demolição após recebidos e tratados (Figura 3.6), atravessam as etapas descritas posteriormente (Silva, 2016):

- No ato de receção dos resíduos ocorre uma pré-seleção do material, onde as peças de betão com qualidade e sem vestígios de terra vegetal colocam-se diretamente na britadeira dando origem a um agregado reciclado com as dimensões pretendidas;
- O material que não foi pré-selecionado é sujeito a um processo de reciclagem distinto, onde primeiramente é separado em dois tipos de granulometria, 0 a 30 mm e superior a 30 mm;
- Seguidamente, procede-se a uma triagem mecânica, onde é retirado o metal, plástico, madeira, entre outros. Se necessário realiza-se também uma triagem manual de modo a recolher manualmente os resíduos indesejáveis que não foram rejeitados durante a triagem mecânica;
- No final, o material é separado por diferentes granulometrias, resultando num agregado britado fino (0-10 mm), médio (10-30 mm) e grosso (30-80 mm e superior a 80 mm), Figura 3.7 .



Figura 3.6 - Processo dos RCD na Resíduos de Construção e Demolição, SA

Fonte: (RCD - Resíduos de Construção e Demolição)



Figura 3.7 - Agregados e resíduos na Resíduos de Construção e Demolição, SA

Fonte: (RCD - Resíduos de Construção e Demolição)

É importante salientar que apesar de os resíduos de construção britados mencionados anteriormente serem valorizados, nem todos poderão ser próprios para venda, como a parte rejeitada, que é destinada para aterro (Pereira, 2015).

Para o estudo do presente trabalho, utilizou-se uma amostra semelhante às de trabalhos anteriores efetuado por (Alonso, 2016; Pereira, 2015; Silva, 2016) correspondente ao agregado britado mais fino (0-10 mm), proveniente do processo de reciclagem. Este material mais fino como tem uma absorção superior de água e por vezes componentes prejudiciais na sua constituição, poderá comprometer a trabalhabilidade e qualidade do betão. Sobretudo por estas razões não é ainda possível utilizar este agregado fino em betão do ponto de vista legal. Na realidade quer a norma europeia (NP EN 12620:2002+A12010) quer a especificação do (LNEC E 471 2009) referem a utilização de agregado reciclado, mas apenas o agregado grosso. Por isso, é fundamental realizar mais investigação de modo a introduzir este resíduo na indústria da construção, certamente com requisitos mais exigentes dos que os relativamente ao agregado grosso reciclado, mas atribuindo-lhe um destino final viável.

3.2.5.2.CDWs (CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE SAND)

Com a amostra de agregado fino 0-10 mm recolhida (Figura 3.8), e tendo conhecimento da composição granulométrica da areia CEN (Tabela 3.6), iniciou-se o processamento deste material (RCD), de modo a obter uma granulometria equivalente.



Figura 3.8 - Amostras de agregado britado fino recolhidas (0-10 mm)

Primeiramente todo o material a utilizar foi lavado no peneiro de lavagem (0,063 mm) e colocado em estufa a $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ (Figura 3.9).



Figura 3.9 - Material após lavagem, pronto para colocar na estufa a $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$.



Figura 3.10 - Material depois da secagem (atingindo massa constante)

Quando atingiu massa constante (Figura 3.10), esquartelou-se e fez-se passar uma quantidade pela série de peneiros base, excluindo-se todo o material retido no peneiro de 2 mm. O restante material, correspondente aos peneiros de 1 mm, 0,5 mm, 0,250 mm, 0,125 mm e 0,063 mm foi sujeito a uma peneiração mecânica seguida de uma peneiração manual, peneiro a peneiro (Figura 3.11).



Figura 3.11 - Peneiração manual

Devido à granulometria da areia britada de RCD (Figura 3.12), este processo foi muito trabalhoso, tendo demorado semanas pois as frações de 1/2 mm e 0,500/1 mm eram muito críticas, obtendo-se quantidades muito baixas de material retido após peneiração. Como o objetivo consistia na substituição de 100% de areia CEN pela areia britada de RCD com a mesma granulometria, foram necessárias muitas operações de peneiração (cerca de 150 kg de material) para se obterem as quantidades necessárias para permitir granulometria equivalente das amostras. O material assim obtido, isto é, o agregado fino de RCD com granulometria equivalente à da areia CEN, foi designado por CDWs.

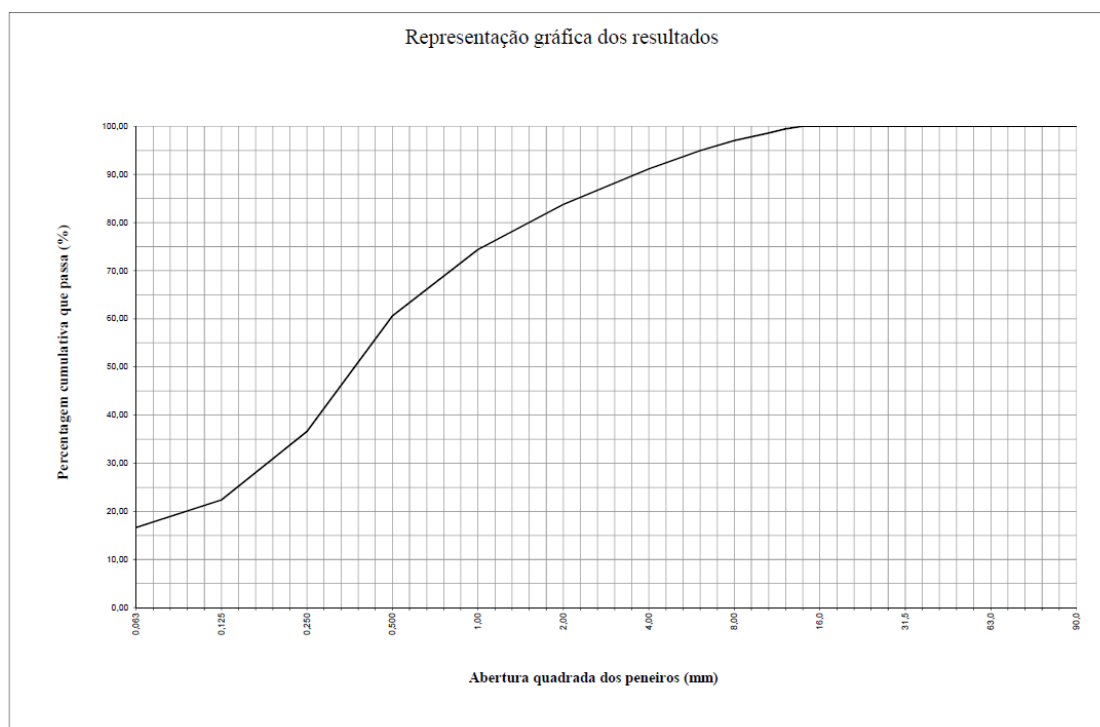


Figura 3.12 - Curva granulométrica do RCD

3.2.5.3. CDWA (CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE ADDITION)

Partindo do material fino rejeitado no processo anterior, para o material de RCD passado no peneiro 0,063 mm procedeu-se a uma moagem num moinho Retsch PM100 (Figura 3.13), de forma a obter um material muito fino, de finura maior do que a do cimento, de modo a ser realizada uma substituição parcial do cimento em argamassa, isto é, para o estudo do material assim obtido como adição. (Note-se que de facto, parte dos finos tinham já sido perdidos por lavagem inicial no peneiro 0.063 mm. Na realidade não teria sido possível considerar essa questão nesta tese devido ao tempo limitado).



Figura 3.13 - Moinho Retsch PM100

O processo de moagem foi realizado tendo por base uma experiência anterior da equipa de investigação.

Numa fase inicial foram colocados 150 g de CDWs passado no peneiro 0,063 mm no almofariz com cerca de 100 g de álcool (Figura 3.14) e, posteriormente, foram realizadas duas fases de moagem, de forma a rentabilizar o processo. A primeira fase consistiu em moer este preparado durante 15 min com esferas de zircónio de 20 mm a uma velocidade de rotação de 350 rpm (Figura 3.15), que de seguida passou para a segunda fase, que consistiu novamente numa moagem, com a mesma velocidade, porém, com duração de 10 min e esferas de 1 mm (Figura 3.16). Decidiu-se utilizar o álcool porque segundo o Projeto PTDC/ECM/098117/2008, os investigadores verificaram uma significativa redução na granulometria do material com o seu uso (Alonso, 2016)

Posto isto, foi necessário secar a amostra na estufa durante 24h a uma temperatura de 110 ± 5 °C e efetuar peneiração mecânica e manual da amostra, denominando-se o resultado final por CDWa (Figura 3.17).



Figura 3.14 - Colocação de 150 g de rejeitado do CDWs passado no #0,063 mm no almofariz com cerca de 100 g de álcool



Figura 3.15 – Moagem durante 15 min com esferas de zircônio de 20 mm (Fase 1)



Figura 3.16 - Moagem durante 10 min com esferas de 1 mm (Fase 2)



Figura 3.17 - CDWa após secagem e peneiração mecânica e manual

Foram então realizadas análises granulométricas a laser quer do material passado no peneiro (#)0,063 mm rejeitado do processo de preparação do CDWs e que se utilizou para preparar o CDWa, quer do material moído resultante designado por CDWa.

Os resultados dessas análises (Tabela 3.7) revelaram então que o material moído (CDWa) e não moído (rejeitado de CDWs passado no peneiro 0,063 mm) apresentavam uma granulometria muito semelhante entre si. Além disso, para o material rejeitado de CDWs passado no peneiro 0,063 mm, segundo esta

análise, não continha partículas entre 4 e 63 microns. Como este resultado não podia corresponder à realidade uma vez que o processo de moagem foi intensivo, resolveu-se tentar compreender como havia sido realizado o processo de preparação das amostras uma vez que o ensaio tinha sido realizado num Laboratório exterior.

Tabela 3.7 – Granulometria (incorreta) a laser do CEM I, CDWa e rejeitado de CDWs passado no #0,063 mm

Amostra	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)	Dmédio (μm)
CEM I 42,5 R	1,15	14,85	41,65	18,56
Rejeitado de CDWs passado no #0,063mm	0,52	3,50	7,23	3,69
CDWa	0,73	3,54	7,85	3,93

Percebeu-se então, que pelo menos o procedimento de preparação das amostras no Laboratório exterior não tinha incluído a fase de dispersão prévia das partículas. Assim sendo, foram requeridas novas análises, desta vez, com dispersão de ultrassons, onde se pode constatar o efeito da moagem nos resultados apresentados de seguida (Tabela 3.8 e Figura 3.18):

Tabela 3.8 - Granulometria com ultrassons do CEM I, CDWa e rejeitado do CDWs passado no #0,063 mm

Amostra	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)	Dmédio (μm)
CEM I 42,5 R	1,15	14,85	41,65	18,56
Rejeitado de CDWs passado no #0,063mm	2,10	17,27	49,40	21,89
CDWa	1,26	6,55	16,51	9,24

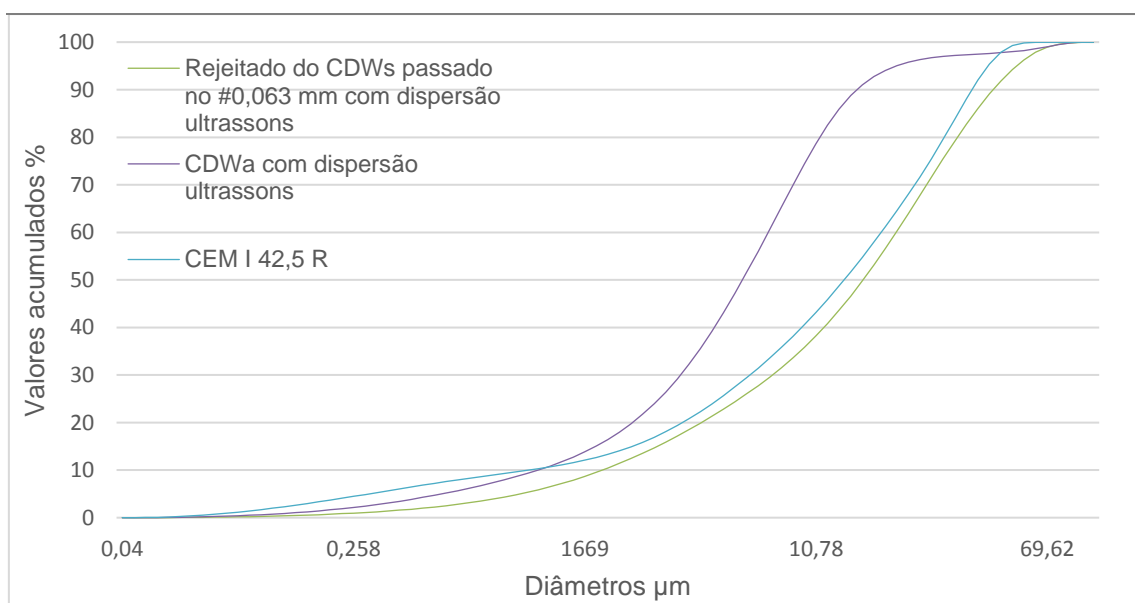


Figura 3.18 - Curva granulométrica com ultrassons do CEM I, CDWa (CDW moído) e CDWs passado no peneiro 0,063 mm (CDW não moído)

Assim, o material utilizado como adição neste trabalho, isto é, o CDWa, corresponde às partículas abaixo de 0,063 mm rejeitadas do agregado fino de RCD, correspondentes à amostra de resíduo agregado fino de RCD recolhida, de resíduos de construção e demolição. Na realidade poder-se-ia designar por R³ (resíduo do resíduo do resíduo) e podendo-se utilizar este material assim processado, será sem dúvida uma contribuição para a estratégia do “Resíduo Zero” e para a Economia Circular.

3.3. ENSAIOS LABORATORIAIS REALIZADOS

3.3.1.COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA AMOSTRA

Como o RCD é semelhante ao utilizado em trabalhos anteriores efetuados por (Alonso, 2016; Pereira, 2015; Silva, 2016), por sua vez, também não será muito diferente quanto à composição química, que se apresenta na Tabela 3.9 e foi determinada pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG).

Tabela 3.9 - Composição Química do RCD da mesma origem, determinada pelo LNEG (Silva, 2016) e (Alonso, 2016)

Composição química	RCD
Perda ao fogo (%)	8,17
Óxido de Silício - SiO ₂ (%)	72,27
Óxido de Alumínio - Al ₂ O ₃ (%)	5,10
Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃ (%)	3,25
Óxido de Cálcio - CaO (%)	8,27
Óxido de Magnésio - MgO (%)	0,28
Óxido de Sódio - Na ₂ O (%)	0,31
Óxido de Potássio - K ₂ O (%)	1,84
Óxido de Titânio - TiO ₂ (%)	0,20
Óxido de Manganês - MnO (%)	0,04
Pentóxido de Fósforo - P ₂ O ₅ (%)	0,08
Sulfatos - SO ₃ (%)	0,31
Cloretos - Cl ⁻ (%)	< 0,02

3.3.2.MASSA VOLÚMICA DOS AGREGADOS

O presente ensaio segue a (NP EN 1097-6 2016), que especifica os métodos para a determinação da massa volúmica das partículas e da absorção de água dos agregados.

Para iniciar o procedimento experimental, preparou-se a amostra, de massa igual ou superior a 1 kg, lavou-se no peneiro de 4 mm e de 0,063 mm de forma a remover as partículas mais finas e rejeitaram-

se as que ficaram retidas no peneiro de 4 mm. De seguida, secou-se a amostra na estufa a 110 °C até atingir massa constante e espartelou-se de forma a dividir a amostra em duas partes (o valor da massa volúmica do material é a média dos dois resultados obtidos) (Figura 3.19). Colocou-se uma subamostra no picnómetro com água (22 ± 3) °C, eliminou-se o ar ocluído (rodando o frasco e agitando em posição inclinada para eliminar possíveis bolhas de ar) e inseriu-se em banho maria, para manter o provete a uma temperatura de (22 ± 3) °C durante ($24\pm 0,5$) h (Figura 3.20). Quando terminou o período de imersão, retirou-se o picnómetro do banho maria e novamente, removeu-se o ar ocluído da mesma forma anteriormente mencionada. No passo seguinte, fez-se transbordar o picnómetro por adição de água (Figura 3.21), colocou-se a tampa sem deixar ar dentro do mesmo, para depois secar por fora, pesar (M_2) e registar a temperatura da água (Figura 3.22). Após a medição da temperatura, decantou-se a maior parte da água que cobria o provete com auxílio de um filtro (Figura 3.23) e esvaziou-se o picnómetro sobre um tabuleiro. Posto isto, encheu-se o picnómetro novamente com água, colocou-se a tampa como anteriormente, secou-se por fora, pesou-se (M_3) e registou-se a temperatura da água.



Figura 3.19 - Amostra seca de RCD dividida em duas partes



Figura 3.20 - Picnómetro com o preparado em banho maria (22 ± 3) °C



Figura 3.21 - Adição de água para fazer transbordar o picnómetro



Figura 3.22 - Registo da temperatura da água



Figura 3.23 – Decantação da maior parte da água que cobre o provete com auxílio de um filtro

O passo seguinte consistiu em espalhar o provete molhado numa camada uniforme sobre o tabuleiro, de forma a que este esteja exposto a uma corrente de ar morno para que evapore a humidade superficial. Deve-se remexer o provete em intervalos frequentes até secar homogeneamente para que não sejam perceptíveis sinais de humidade e as partículas se encontrem soltas. Para avaliar que foi atingido o estado de superfície seca, utilizou-se um molde troncocónico de metal, encheu-se, deram-se 25 pancadas com o pilão para apiloar a superfície e retirou-se o molde cuidadosamente. Se o agregado apresentar uma forma troncocónica, continua-se procedimento de secagem (Figura 3.25) e repete-se o ensaio do cone até que o agregado se deforme após desmoldagem (Figura 3.26), como explicado na Figura 3.24. Por fim, pesa-se o provete saturado com superfície seca (M_1) e coloca-se na estufa o agregado à temperatura de 110 ± 5 °C até secar até massa constante (M_4). Repete-se o processo para a outra subamostra.

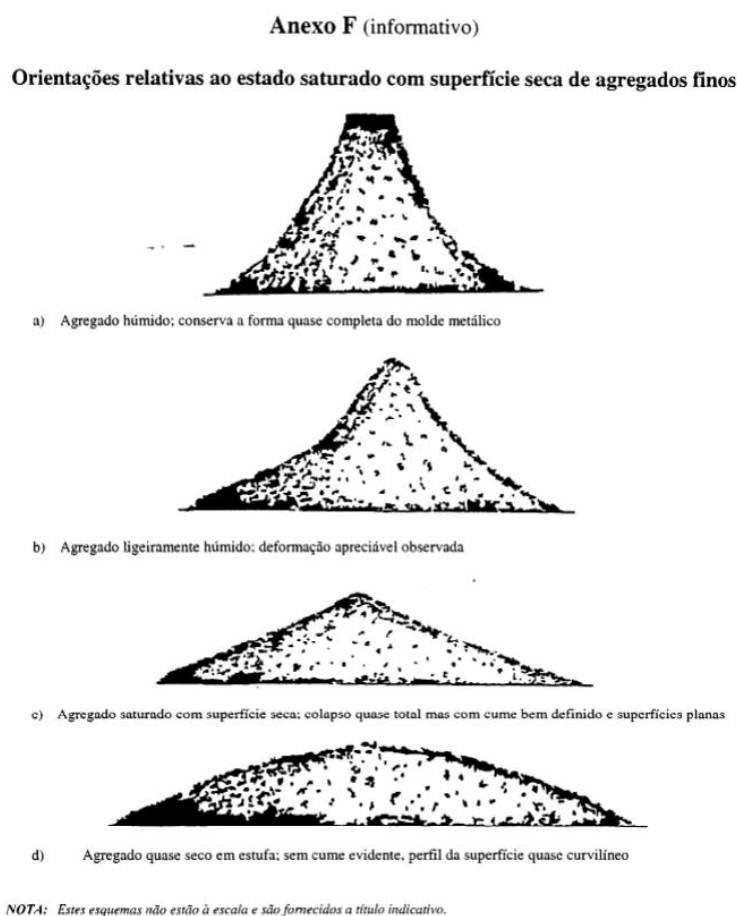


Figura 3.24 - Orientações relativas ao estado saturado com superfície seca dos agregados finos

Fonte: Anexo F (NP EN 1097-6 2016)



Figura 3.25 – Agregado ligeiramente húmido



Figura 3.26 – Agregado quase seco, sem cume evidente

Para o cálculo das massas volúmicas das partículas (ρ_a , ρ_{rd} e ρ_{ssd}) e absorção de água (em percentagem da massa seca) após imersão durante 24 h, recorreram-se às seguintes expressões:

Massa Volúmica do material impermeável das partículas	$\rho_a = \rho_W * \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]}$	3.2
---	---	-----

Massa Volúmica das partículas secas em estufa	$\rho_{rd} = \rho_W * \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]}$	3.3
---	--	-----

Massa Volúmica das partículas saturadas com superfície seca	$\rho_{ssd} = \rho_W * \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]}$	3.4
---	---	-----

Absorção de água após imersão durante 24 h

$$WA_{24} = \frac{100 \cdot (M_1 - M_4)}{M_4}$$

3.5

Sendo,

M_1 a massa do agregado saturado com a superfície seca ao ar, em gramas;

M_2 é a massa do picnómetro contendo o provete de agregado saturado e a água, em gramas;

M_3 é a massa do picnómetro apenas cheio de água, em gramas;

M_4 é a massa no ar do provete seco em estufa, em gramas.

ρ_w é a massa volúmica da água à temperatura do ensaio, em megagrama por metro cúbico (Anexo D (NP EN 1097-6 2016)).

Encontram-se na Tabela 3.10 os resultados das massas volúmicas e de absorção de água da areia normalizada CEN e do CDWs:

Tabela 3.10 - Resultados obtidos no ensaio de massa volúmica

Fração granulométrica	(mm)	Areia CEN (0,063/4,0)	CDWs (0,063/4,0)
ρ_w	(Mg/m ³)	0,998	0,998
ρ_a	(Mg/m ³)	2,639	2,610
ρ_{rd}	(Mg/m ³)	2,625	2,492
ρ_{ssd}	(Mg/m ³)	2,631	2,537
WA_{24}	(%)	0,200	1,825

3.3.3.BLAINE

O ensaio de permeabilidade ao ar (Blaine) realizou-se de acordo com a norma (NP EN 196-6 2010) e tem como objetivo avaliar a finura dos materiais, a partir da determinação da superfície específica. A superfície específica serve principalmente para verificar a eficácia do processo de moagem (Figura 3.27). Foi necessário realizar primeiramente o ensaio de massa volúmica, uma vez que a expressão da superfície específica requiere esse valor.



Figura 3.27 - Equipamento para determinar a superfície específica – Blaine

Iniciou-se o procedimento experimental agitando-se a amostra durante cerca de 2 minutos num recipiente fechado de modo dispersar os grumos, depois deixou-se em repouso novamente 2 minutos e mexeu-se o material para distribuir os finos por toda a amostra. Como o valor da massa volúmica já tinha sido determinado, calculou-se a quantidade necessária para a realização do ensaio e pesou-se (Figura 3.28).

Seguidamente, colocou-se na célula o disco perfurado com um filtro de papel por cima, seguido do material a analisar e no topo novamente um filtro de papel (Figura 3.29).

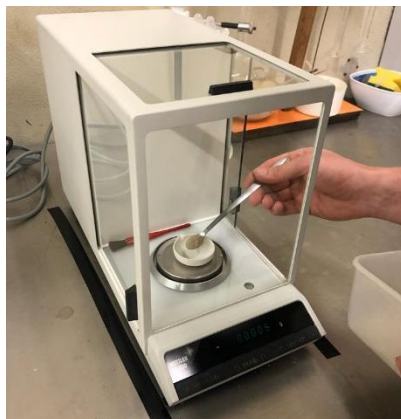


Figura 3.28 - Pesagem do material

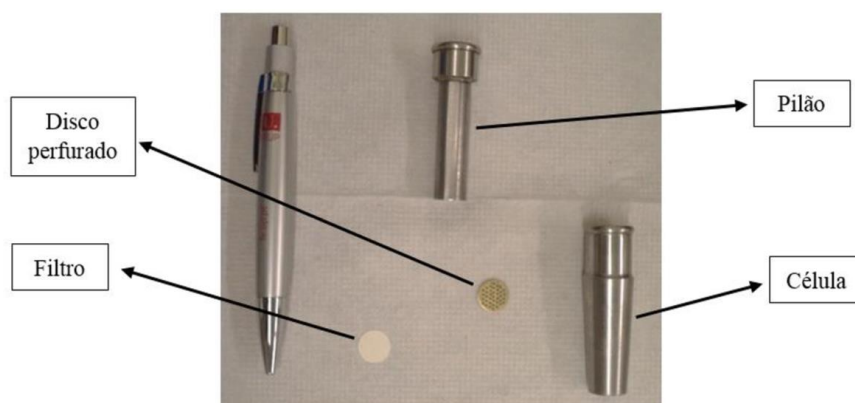


Figura 3.29 - Equipamento para verificar as quantidades de material necessárias para ensaiar

Fonte: (Silva, 2016)

De modo a compactar a camada, introduziu-se um pistão até ao filtro colocado no topo e comprimiu-se moderadamente. Assim, verificou-se que a quantidade de material era a adequada quando a face inferior do pistão fica em contacto com a célula exercendo uma ligeira pressão, ou seja, se ao colocar o pistão, a sua parte inferior toque imediatamente na célula, então a quantidade de material não é a suficiente.

Assim, terminada a preparação da camada, introduziu-se a célula no manómetro e aplicou-se um pouco de lubrificante de modo a que não houvesse passagem de ar na junta.

Após verificar que não há passagem de ar, retira-se a rolha do manómetro e simultaneamente inicia-se a contagem do tempo que o ar demorou a atravessar a camada que estava dentro da célula. Registou-se

esse tempo e repetiu-se o ensaio exatamente da mesma forma e com a mesma quantidade, salientando-se que desde o início foi medida a humidade relativa, que deve estar abaixo dos 65 %, uma vez que influencia significativamente a medição.

A superfície específica calculou-se tanto para o cimento CEM I 42,5 R como para o CDWa, recorrendo à seguinte expressão:

$$S = \frac{K}{\rho} * \frac{\sqrt{e^3}}{1 - e} * \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{10\eta}}$$

3.6

Sendo,

K é a constante do aparelho (subcapítulo 4.7.2 (NP EN 196-6 2010));

e é a porosidade da camada;

t é o tempo medido (s);

ρ é a massa volúmica do cimento (g/cm^3);

η é a viscosidade do ar à temperatura do ensaio (Pa.s) (conforme o quadro 1 (NP EN 196-6 2010)).

Os resultados do cimento e do CDWa apresentam-se na Tabela 3.11.

Note-se que, como o cimento foi o mesmo que o utilizado por a equipa de investigação em 2018, foram apresentados os valores dos seus resultados.

Tabela 3.11 - Tempos medidos em segundos para cada amostra de CEM I 42,5 R e CDWa

	CEM I 42,5 R Amostra 1		CEM I 42,5 R Amostra 2		CDWa Amostra 1		CDWa Amostra 2	
Quantidade de material a usar (g)	2,840	2,840	2,840	2,840	1,879	1,879	1,879	1,879
Tempo medido (s)	96	98	97	96	187	186	185	187
Temperatura (°C)	21,3	21,3	21,2	21,3	19,4	19,9	21,6	21,8

De acordo com os resultados da tabela anterior determinamos:

- Superfície específica do cimento ($\rho=3,11$)

$$S = \frac{22,54}{3,11} * \frac{\sqrt{0,500^3}}{1 - 0,500} * \frac{\sqrt{97}}{0,013506} \leftrightarrow S = 3737 \text{ cm}^2/\text{g}$$

3.7

- Superfície específica do CDWa ($\rho=2,61$)

$$S = \frac{22,54}{2,61} * \frac{\sqrt{0,606^3}}{1 - 0,606} * \frac{\sqrt{186}}{0,013506} \leftrightarrow S = 10440 \text{ cm}^2/g$$

3.8

3.3.4. ENSAIOS COM ARGAMASSA

3.3.4.1. COMPOSIÇÃO E FABRICO DOS PROVETES DE ARGAMASSA

O fabrico de provetes realizou-se de acordo com a norma (NP EN 196-1 2017) e para as argamassas de controlo seguiu-se a constituição típica de uma argamassa normalizada, formada por uma parte de cimento, três partes de areia normalizada CEN e meia parte de água. Desta forma, os primeiros provetes a preparar foram precisamente os de controlo (CTL1 e CTL2), de constituição referida anteriormente, isto é, traço em peso 1:3:0,5, (Tabela 3.12) e procedimento resumido na Figura 3.30.

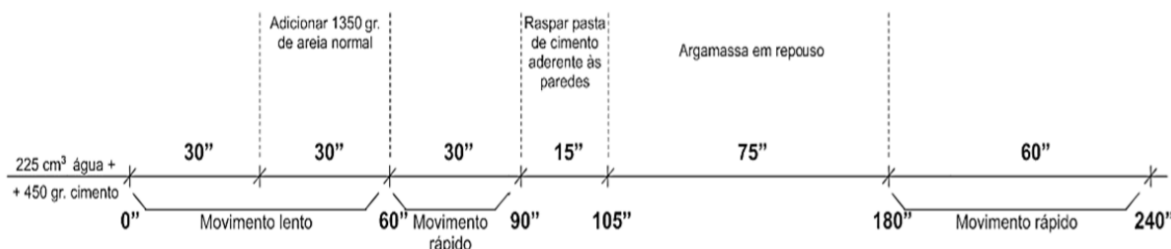


Figura 3.30 - Procedimento de fabrico de argamassas

Fonte: (Coutinho, 2002)

Tabela 3.12 - Quantidades dos materiais para as argamassas de controlo

Componente	CTL1	CTL2
Água (ml)	225,0	225,0
CEM I 42,5 R (g)	450,0	450,0
Areia CEN (g)	1350,0	1350,0

Como os materiais de substituição utilizados apresentam massa volúmica diferente das massas volúmicas dos materiais a substituir considerou-se que os cálculos deveriam ser realizados em volume. De facto, quando se substitui areia com massa volúmica diferente, como a areia ocupa um grande volume na argamassa é importante considerar esta questão. Quando se substitui parcialmente o cimento por uma adição, esta questão não é tão importante, pois trata-se de pequenas quantidades. Note-se também que como se trata de resíduos de construção e demolição estes materiais tem uma absorção que poderá ser muito mais elevada que um agregado natural devido à pasta endurecida aderente. Aliás, esta questão é das mais pertinentes relativas ao uso de agregado reciclado.

Assim, além de se terem realizado os cálculos em volume (3.9 e 3.10), também se considerou a absorção da areia reciclada e aumentou-se o tempo de mistura (ver Figura 3.31).

Para o valor da água de absorção do CDWs depois de se determinar o valor da absorção às 24 horas, considerou-se que ao fim de 10 min cerca de 50% desse valor seria absorvido partindo do princípio de que o material estaria em equilíbrio com o ambiente de laboratório e, portanto, com alguma humidade.

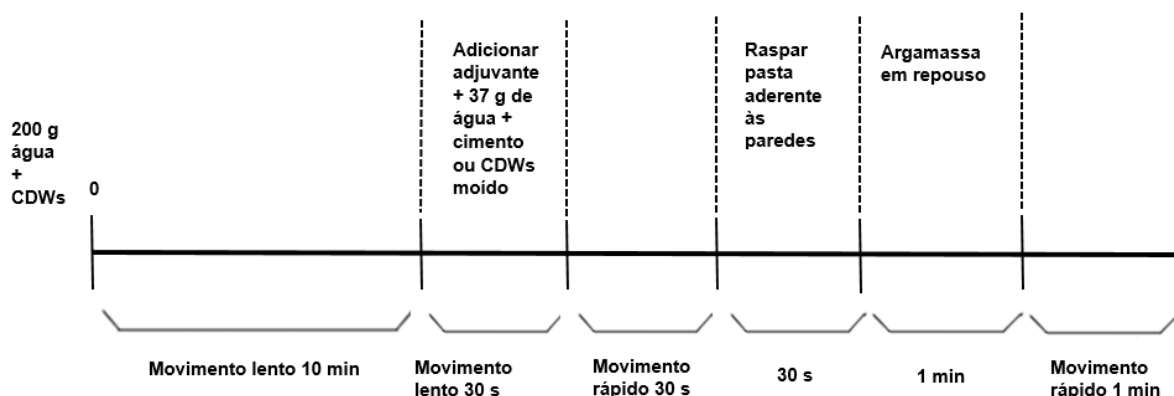


Figura 3.31 - Procedimento de fabrico das argamassas com substituição de areia (CDWs e CDWs+5CDWa)

Por exemplo:

$$\frac{1350 \text{ g (areia CEN)}}{2631 \text{ g/dm}^3 (\rho_{ssd} \text{ areia CEN})} = 0,513 \text{ dm}^3 \quad 3.9$$

$$0,513 \text{ dm}^3 * 2537 \text{ g/dm}^3 (\rho_{ssd} \text{ RCD}) = 1301 \text{ g de CDWs necessário} \quad 3.10$$

Posto isto, apresentam-se na Tabela 3.13 as quantidades necessárias de cada componente, para a realização das argamassas presentes neste estudo:

Tabela 3.13 - Quantidades dos componentes para cada argamassa

	CEM I (g)	Areia CEN (g)	CDWa (g)	CDWs (g)	Água (g)	Adjuvante (g)
CTL1 e CTL2	450	1350	0	0	225	0
CDWs	450	0	0	1301	237	5,85
5CDWa	428	1350	19	0	225	0
CDWs + 5CDWa	428	0	19	1301	237	5,85

Terminando as amassaduras, procedeu-se com os ensaios de trabalhabilidade, mencionados em 3.3.4.2 até se alcançar a mesma ordem de grandeza da trabalhabilidade das argamassas de controlo e, com isto, passou-se à moldagem das argamassas. A moldagem inicia-se engordurando todos os moldes com óleo (para não dificultar a desmoldagem) e diferencia-se conforme o ensaio realizado, tanto nos moldes como no tipo de compactação (Tabela 3.14). Para além disso, colocou-se um vidro oleado por cima dos moldes no caso dos ensaios onde se utilizam provetes cilíndrico e também uma fita adesiva à volta de todo o molde para facilitar a limpeza na desmoldagem (Figura 3.33).

Tabela 3.14 - Particularidades da moldagem para cada ensaio (Rocha, 2016)

Ensaio	Tipo de Provete	Dimensões do Provete	Tipo de Compactação	Número de Pancadas	Figuras
Resistências Mecânicas e Resistividade	Prismático	40x40x160 mm	Mecânica	60 para cada camada (2 camadas)	Figura 3.32
Carbonatação Acelerada	Prismático	40x40x160 mm	Mecânica	60 para cada camada (2 camadas)	Figura 3.32
Absorção de água por Capilaridade	Cilíndrico	Diâmetro = 100 mm Altura= 50 mm	Mesa Vibratória Duração = 30 s	-	Figura 3.33
Penetração de Cloretos	Cilíndrico	Diâmetro = 100 mm Altura= 50 mm	Mesa Vibratória Duração = 30 s	-	Figura 3.33
Reação Álcis-Sílica (ASR)	Prismático	25x25x250 mm	Manual	q.b (2 camadas)	Figura 3.35
Resistência ao ataque por Sulfatos	Prismático	20x20x160 mm	Manual	q.b (2 camadas)	Figura 3.34



Figura 3.32 - Compactação dos provetes prismáticos para os ensaios de Resistências Mecânicas, Resistividade e Carbonatação Acelerada (1ª camada)



Figura 3.33 - Compactação na mesa vibratória dos provetes cilíndricos



Figura 3.34 - Moldagem dos provetes prismáticos para o ensaio de Resistência por Sulfatos



Figura 3.35 - Moldagem dos provetes prismáticos para o ensaio de Resistência Álcalis-Sílica

3.3.4.2.AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade traduz-se na maior ou menor facilidade com que o betão é amassado, transportado, colocado, compactado e acabado, bem como na menor ou maior facilidade de segregação durante estas operações (Coutinho, 1999).

A trabalhabilidade pode ser afetada por alguns fatores, tais como (Sobral, 2000):

- Características do próprio betão, representadas pela sua consistência, que corresponde ao grau de plasticidade da massa e pela sua capacidade de se manter homogênea;
- Condições de manuseamento, envolvendo os tipos de equipamentos e sistemas de trabalho adotados nas operações e produção, transporte e lançamento do betão;
- Condições do projeto, caracterizadas pelas dimensões dos elementos de construção e o afastamento das armaduras.

A avaliação da trabalhabilidade realizou-se segundo a norma (EN 1015-3:1999 + A1 2004), que se iniciou humedecendo, com um pano húmido, a mesa de espalhamento tal como o molde troncocónico centrado na mesa. Em seguida encheu-se até metade o molde troncocónico com argamassa, compactou-se com 10 pancadas e voltou a encher-se com uma segunda camada, compactando-se de igual forma à anterior. Quanto se terminaram as 10 últimas pancadas de compactação, retirou-se o molde cautelosamente, e compactou-se novamente a argamassa, todavia, fazendo subir e descer a mesa de espalhamento a partir de uma manivela, 15 vezes durante 15 segundos. No final, mediram-se 4

diâmetros, calculou-se a média e comparou-se com a de referência, de modo a avaliar a trabalhabilidade Figura 3.36.



Figura 3.36 - Compactação (Esq. e Centro) e espalhamento da argamassa (Dir.)

Tal como para a maior parte dos outros ensaios, as primeiras avaliações da trabalhabilidade a serem feitas foram as de controlo, para que fosse possível a partir daí ter uma referência. Como as argamassas com RCD são mais suscetíveis à absorção de água, após algumas tentativas, verificou-se que a trabalhabilidade não respeitava as tolerâncias do intervalo admissível ($\pm 10\text{mm}$), logo não era possível verificar uma trabalhabilidade como às de controlo, por isso, optou-se pelo uso do superplastificante Sika ViscoCrete 20HE. Os diâmetros obtidos encontram-se na próxima tabela (Tabela 3.15):

Tabela 3.15 - Valores da trabalhabilidade média de todas as argamassas

Ensaio	Trabalhabilidade (mm)				
	CTL1	CTL2	CDWs	5CDWa	CDWs+5CDWa
Resistências aos 28 d	196	196	192	196	203
Resistências aos 56 d	199	197	207	196	197
Resistências aos 84 d e Resistividade	198	196	191	197	190
Carbonatação	195	198	196	200	198
Absorção de água por Capilaridade	199	201	194	199	196
Penetração de cloretos	196	198	191	194	199
ASR	199	197	190	195	191
Resistência ao ataque por Sulfatos	196	198	191	194	199
Média Total	197	198	194	196	197
Desvio Padrão	1,67	1,60	5,61	2,20	4,31

Repare-se que foi muito difícil obter resultados homogêneos para a trabalhabilidade e foi necessário em cada amassadura adicionar ligeiramente mais ou menos superplastificante até acertar num valor

constante. Pensa-se que a causa residirá no facto de, mesmo homogeneizando o material previamente, as amostras usadas, teoricamente equivalentes, na prática terão mais ou menos quantidade de matriz cimentícia antiga na composição das partículas de RCD, fazendo variar a trabalhabilidade e também a absorção. Note-se como o desvio padrão das argamassas com CDWs é muito maior do que nas argamassas de CDWa. Nas primeiras, a grande parte do material constituinte da argamassa (1301 gramas) é proveniente de RCD mas nas argamassas de CDWa apenas se usou 19 gramas provenientes de RCD. No entanto, repare-se que as quantidades de material utilizado em cada amassadura são muito reduzidas e que à escala real, este problema será provavelmente diluído nas quantidades muito maiores utilizadas.

3.3.4.3. RESISTÊNCIAS MECÂNICAS

As resistências mecânicas são uma das propriedades mais importantes quando se desenvolvem estudos de substituição e durabilidade em betão. A resistência e a durabilidade do betão são propriedades que dependem da qualidade dos constituintes, nomeadamente dos agregados, já que estes ocupam cerca de três quartos do volume do betão (Neville, 1996). Da mesma maneira, a qualidade de mão de obra aplicada e as condições ambientais a que a estrutura de betão ficará exposta durante a sua vida útil influenciam a durabilidade. Desta forma, a composição do betão deve ser tal que conduza à resistência e durabilidade necessárias.

Para a determinação das resistências foram moldados os 5 tipos de argamassas em provetes de dimensões 40x40x160 mm para os 28, 56 e 84 dias, de acordo com a norma (NP EN 196-1 2017) (Figura 3.37). Produziu-se um total de 45 provetes que após desmoldagem foram mantidos na câmara húmida até perfazerem o número de dias para ensaiar (Figura 3.38).



Figura 3.37 - Moldagem dos provetes



Figura 3.38 - Provetes após desmoldagem

Passado o tempo de cura correspondentes, os provetes foram desmoldados e procedeu-se à colocação de cada um na máquina de flexão. O ensaio resume-se à aplicação de uma carga vertical de crescimento gradual até à rotura do provete, sendo indicado no equipamento, o valor da força máxima de rotura por flexão (Figura 3.39).



Figura 3.39 - Ensaio de resistência à flexão

De seguida, determinou-se a resistência à compressão de cada meio prisma obtido no ensaio de flexão mencionado anteriormente. Após posicionamento correto de cada meio prisma entre os pratos do equipamento, foi aplicada, de forma contínua, uma carga crescente até à rotura, tendo-se anotado a respetiva força máxima de rotura por compressão (Figura 3.40).



Figura 3.40 - Ensaio de Resistência à Compressão

Após todas as determinações para os provetes das 5 argamassas, foi possível determinar a resistência à flexão correspondente à média aritmética dos resultados das resistências à flexão de três provetes para cada uma das 5 argamassas, enquanto a resistência à compressão corresponde à média de seis resultados. É necessário ter em atenção que os resultados têm que estar incluídos no intervalo de $\pm 10\%$ da média, uma vez que, se não ocorrer, é excluído o valor mais dissonante e faz-se a média com os 5 provetes restantes. Apresentam-se os resultados para as resistências à flexão (Tabela 3.16, Tabela 3.17 e Tabela 3.18) e compressão (Tabela 3.19, Tabela 3.20 e Tabela 3.21) para os 28, 56 e 84 dias, assim como a respetiva evolução no tempo (Figura 3.41 e Figura 3.42).

Tabela 3.16 - Resistência à flexão média (cura de 28 dias)

Argamassas	Idade (dias)	Resistência à flexão média (MPa)	Desvio Padrão	Desempenho (%)
CTL1	28	7,7	0,29	
CTL2	28	7,3	0,25	
CDWs	28	6,7	0,12	-11
5CDWa	28	6,6	0,25	-12
CDWs+5CDWa	28	5,4	0,40	-28

Tabela 3.17 - Resistências à flexão médias (cura de 56 dias)

Argamassas	Idade (dias)	Resistência à flexão média (MPa)	Desvio Padrão	Desempenho (%)
CTL1	56	7,7	0,40	
CTL2	56	7,6	0,60	
CDWs	56	6,9	0,23	-10
5CDWa	56	6,8	0,00	-11
CDWs+5CDWa	56	4,5	1,62	-41

Tabela 3.18 - Resistências à flexão médias (cura de 84 dias)

Argamassas	Idade (dias)	Resistência à flexão média (MPa)	Desvio Padrão	Desempenho (%)
CTL1	84	8,1	0,12	
CTL2	84	8,0	0,40	
CDWs	84	7,4	0,36	-8
5CDWa	84	7,3	0,00	-9
CDWs+5CDWa	84	5,6	0,25	-30

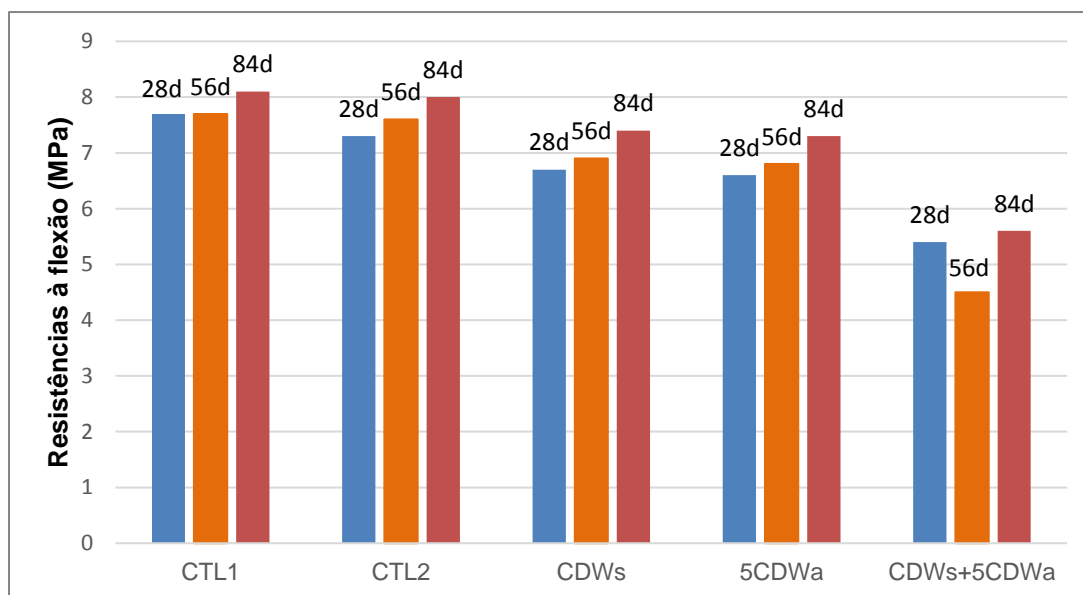


Figura 3.41 - Comparação das resistências à flexão das argamassas em estudo aos 28, 56 e 84 dias

Tabela 3.19 - Resistências à compressão médias (cura de 28 dias)

Argamassas	Idade (dias)	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio Padrão	Desempenho (%)
CTL1	28	55,8	0,58	
CTL2	28	54,2	0,75	
CDWs	28	48,2	0,97	-12
5CDWa	28	44,6	0,86	-19
CDWs+5CDWa	28	34,8	2,76	-37

Tabela 3.20 - Resistências à compressão médias (cura de 56 dias)

Argamassas	Idade (dias)	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio Padrão	Desempenho (%)
CTL1	56	59,0	1,19	
CTL2	56	59,1	0,82	
CDWs	56	50,7	3,20	-14
5CDWa	56	48,1	1,03	-19
CDWs+5CDWa	56	31,8	2,28	-46

Tabela 3.21 - Resistências à compressão médias (cura de 84 dias)

Argamassas	Idade (dias)	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio Padrão	Desempenho (%)
CTL1	84	65,4	1,18	
CTL2	84	65,7	1,01	
CDWs	84	54,7	1,63	-17
5CDWa	84	53,0	0,96	-19
CDWs+5CDWa	84	35,9	2,08	-45

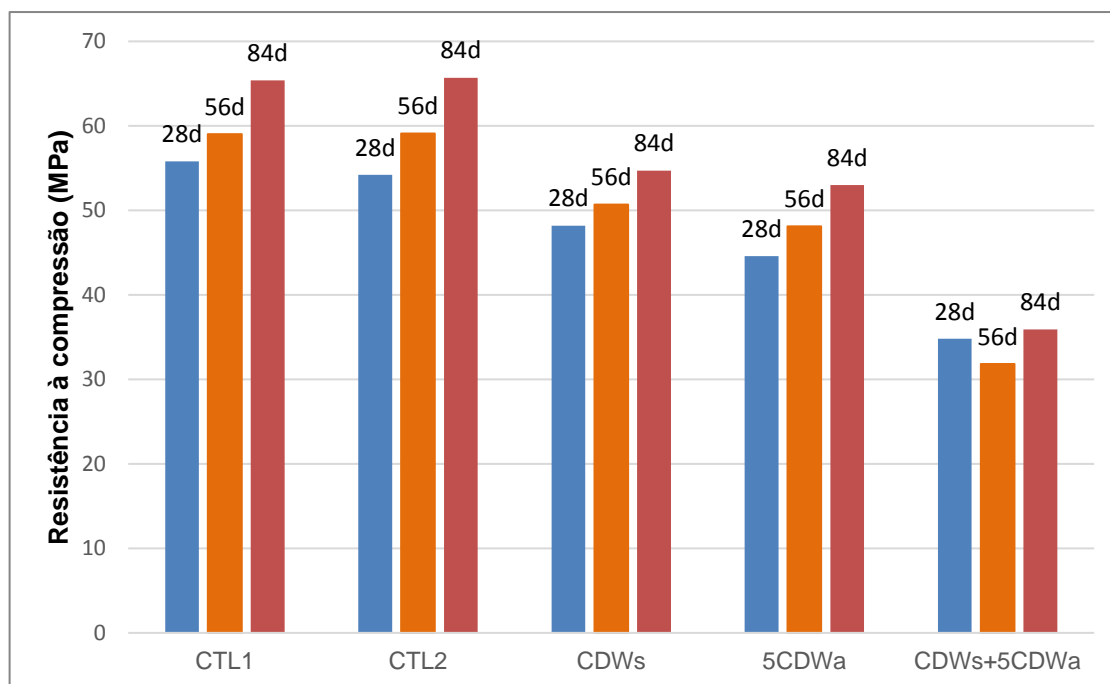


Figura 3.42 - Comparação das resistências à compressão das argamassas em estudo aos 28, 56 e 84 dias

3.3.4.4. CARBONATAÇÃO ACELERADA

A carbonatação do betão é um processo em que o dióxido de carbono da atmosfera reage, em primeiro lugar, com os hidróxidos da fase aquosa do betão, originando uma neutralização de todo o material. Desta forma, a reação de hidróxido de cálcio (resultante da hidratação do cimento) com o dióxido de carbono do ar (que por difusão penetra nos poros à superfície passando lentamente para o interior do betão) resulta em carbonato de cálcio. Este último, conduz a uma redução da alcalinidade do betão, uma vez que o pH inicial de 12,5 devido à forte alcalinidade do hidróxido de cálcio, pode passar a ser inferior a 9. Quando a frente de carbonatação do betão de recobrimento atinge as armaduras estas despassivam e se houver humidade e oxigénio suficientes inicia-se o processo de corrosão de armaduras e a degradação, reduzindo a durabilidade do betão armado.

Uma circunstância favorável é que, à medida que a carbonatação avança, há substituição do hidróxido de cálcio pela calcite (carbonato de cálcio), que contribui para a diminuição da porosidade do betão superficial e, conseqüentemente, o acesso do dióxido de carbono torna-se mais difícil. A carbonatação superficial tem, portanto, uma ação passivante (Begonha, 2018; Moreira, 2014).

O ensaio realizou-se seguindo, na parte aplicável, a especificação (LNEC E 391 1999) para determinação de resistência à carbonatação, utilizando provetes de argamassa de 40x40x160 mm inicialmente colocados em água na câmara húmida 56 dias. Após este tempo de cura, ficaram 14 dias na câmara de fluência a uma humidade relativa de 55% e $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ e por fim, transferiram-se para a câmara de carbonatação durante 5 semanas com uma humidade relativa de 55-65%, à temperatura de $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$ e uma alimentação de ar com $(5 \pm 0,1) \% \text{CO}_2$. Posto isto, depois de retirados da câmara de carbonatação foram cortados com serra aproximadamente 4 cm de espessura do topo de cada provete (identificando-se a face S como face de enchimento) e as faces serradas foram pulverizadas com solução de fenolftaleína. Caso o provete apresente uma cor rosa, então trata-se de uma zona sem carbonatação, ou seja, pH elevado, se não houver alteração de cor então corresponde a uma zona carbonatada e consequentemente de pH baixo (Figura 3.43).



Figura 3.43 - Provetes pulverizados com solução de fenolftaleína

Assim, é possível proceder com as devidas medições que, segundo a especificação (LNEC E 391 1999) deverão ser apresentadas de duas formas:

- Profundidade de Carbonatação máxima ($h_{\text{máx}}$);
- Profundidade de Carbonatação média ($h_{\text{médio}}$).

3.3.4.5. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO MÁXIMA ($H_{\text{MÁX}}$)

Para a medição da profundidade de carbonatação máxima delimitou-se a zona carbonatada da não carbonatada, com um lápis, para facilitar a medição e com o auxílio de um paquímetro realizaram-se 3 leituras da profundidade de carbonatação, por face. Os resultados encontram-se na tabela seguinte (Tabela 3.22), sendo que, correspondem aos valores máximos das medições executadas.

Tabela 3.22 - Profundidade de carbonatação após 5 semanas ($h_{\text{máx}}$)

Argamassas	Profundidade de carbonatação máxima (mm)
CTL1	4
CTL2	4
CDWs	5
5CDWa	6
CDWs + 5CDWa	5

3.3.4.6. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO MÉDIA ($H_{\text{MÉDIO}}$)

Para a medição da profundidade de carbonatação média foram realizados dois procedimentos, o primeiro com o auxílio da ferramenta AutoCad e o segundo de acordo com a recomendação (RILEM CPC-18) como indicado na (LNEC E 391 1999).

Assim, para uma medição mais precisa, utilizou-se primeiramente a ferramenta AutoCAD, já que, as áreas carbonatadas e isentas de carbonatação tinham irregularidades, onde a área carbonatada corresponde à diferença entre a área da secção do provete (40x40 mm) e a área não carbonatada, determinada no AutoCAD (Tabela 3.23).

Posteriormente, foi possível proceder com o cálculo da profundidade de carbonatação (h), considerando como um quadrado a área sem carbonatação, verificado na expressão (3.11) e figura seguintes (Figura 3.44):

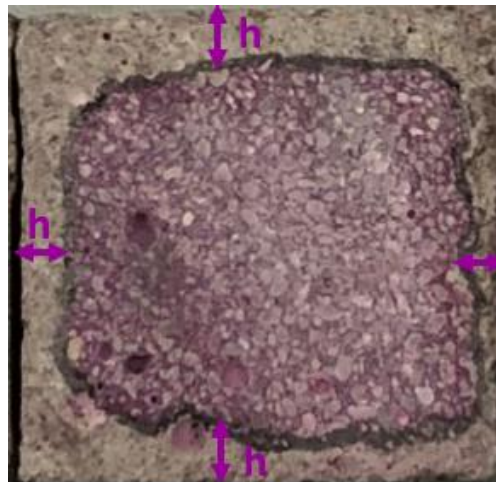


Figura 3.44 - Representação da profundidade de carbonatação (h)

$$h = \frac{+16 \pm \sqrt{16^2 - 4 * 4(16 - A)}}{2 * 4} \leftrightarrow \frac{16 \pm 4\sqrt{A}}{8} \leftrightarrow \frac{4 \pm \sqrt{A}}{2} \leftrightarrow \frac{(4 - \sqrt{A})}{2}$$

3.11

(Como o h varia entre 0 e 2 cm utiliza-se esta expressão)

Sendo:

A é a área sem carbonatação;

4 é o comprimento de uma das faces exterior do quadrado.

Tabela 3.23 - Profundidade de carbonatação para cada argamassa ($h_{\text{médio}}$) AutoCAD (cura de 56 dias)

Argamassas	Provetes	Área Não Carbonatada (cm ²)	h (cm)	$h_{\text{médio}}$ (cm)	Desempenho (%)
CTL1	1	13,20	0,18	0,22	
	2	12,41	0,24		
	3	12,62	0,22		
CTL2	1	13,24	0,18	0,19	
	2	12,74	0,22		
	3	13,44	0,17		
CDWs	1	11,67	0,29	0,27	-32
	2	11,51	0,30		
	3	12,68	0,22		
5CDWa	1	10,76	0,36	0,35	-71
	2	10,50	0,38		
	3	11,31	0,32		
CDWs+5CDWa	1	10,77	0,36	0,35	-71
	2	9,95	0,42		
	3	11,83	0,28		

Por outro lado, utilizou-se o procedimento segundo a recomendação (RILEM CPC-18) referido na (LNEC E 391 1999), que consistiu, em desprezar 1 cm de cada lado da face do provete e com uma régua compensar as irregularidades, medindo as 3 distâncias entre a superfície e a linha da frente da carbonatação para as 4 faces de cada provete Figura 3.45.

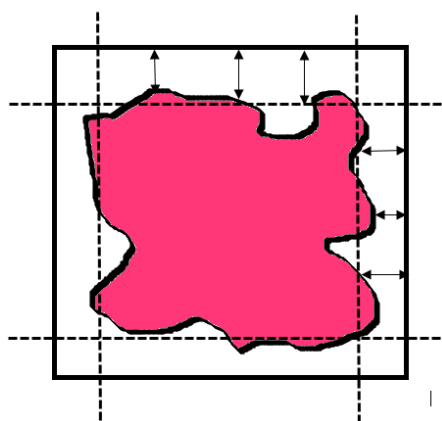


Figura 3.45 - Medição das profundidades de carbonatação segundo a recomendação (RILEM CPC-18)

Os resultados das medições das profundidades de carbonatação ($h_{\text{médio}}$) seguindo este método encontram-se na Tabela 3.24:

Tabela 3.24 - Profundidade média ($h_{\text{médio}}$) segundo a recomendação (LNEC E 391 1999; RILEM CPC-18) (cura de 56 dias)

Argamassas	Provetes	h (cm)	$h_{\text{médio}}$ (cm)	Desempenho (%)
CTL1	1	0,14	0,13	
	2	0,15		
	3	0,11		
CTL2	1	0,15	0,16	
	2	0,19		
	3	0,13		
CDWs	1	0,17	0,23	-59
	2	0,25		
	3	0,27		
5CDWa	1	0,28	0,29	-100
	2	0,31		
	3	0,28		
CDWs+5CDWa	1	0,18	0,27	-86
	2	0,34		
	3	0,28		

3.3.4.7. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A absorção resulta quando a diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior do betão e a sua superfície nos poros capilares origina a entrada de água na rede porosa de betão devido a forças capilares. A absorção será tanto maior quanto maior o diâmetro capilar. Este processo é muito relevante já que, a entrada de água e de agentes agressivos dissolvidos no betão de recobrimento das armaduras em relação à maior parte de obras de betão ocorre através deste processo (Coutinho, 2005).

Para verificar como o material em estudo se comporta em relação ao processo anterior, foi realizado o ensaio de absorção de água por capilaridade seguindo a especificação do (LNEC E 393 1993) e (RILEM TC 116-PCD 1999). Para o ensaio, foram utilizados provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 50 mm de altura, que após desmoldagem foram colocados em água na câmara húmida durante 2 meses e de seguida na estufa a 40 °C aproximadamente 14 dias (até atingirem massa constante). Posteriormente, deixaram-se arrefecer os provetes durante 24 horas. Relativamente ao equipamento para a realização do ensaio, a preparação foi feita 24 horas antes de se iniciarem as leituras, utilizando-se uma caixa com uma grelha e colocados provetes de teste para que se regulasse o nível de água de modo a que a face moldada (superfície de contacto mais lisa) não ultrapassasse uma altura de água de 3 mm a partir da base (Figura 3.46). O modo de montagem do equipamento permitiu que o nível de água se mantivesse constante (Figura 3.47).



Figura 3.46 - Medição do nível de água



Figura 3.47 - Equipamento para ensaio de absorção

Posto isto, iniciou-se o ensaio pesando os provetes (M_0), de seguida foi-se colocando um a um na caixa com água, ligou-se o cronómetro e em intervalos de tempo pré-estabelecidos foram pesados (M_i). O excesso de água a cada pesagem foi retirado com um pano e rapidamente foram colocados novamente em água. O ensaio decorreu durante 24 horas (Figura 3.48 e Figura 3.49).



Figura 3.48 - Excesso de água retirado

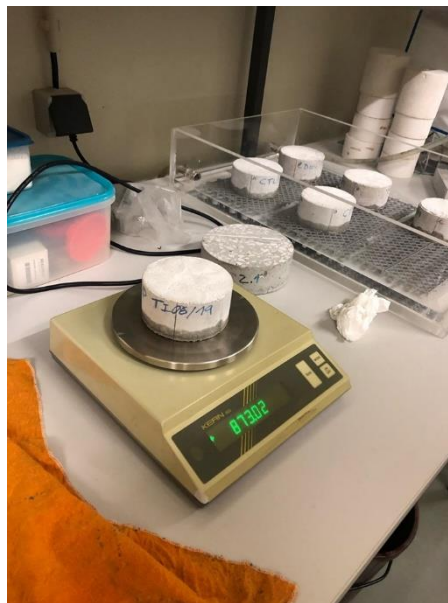


Figura 3.49 - Pesagem dos provetes

Finalizado o ensaio, calculou-se a massa de água absorvida ($M_i - M_0$) por unidade de área da superfície do provete em contacto com a água.

A relação da massa de água absorvida por unidade de área com a raiz do tempo corresponde à curva de absorção que se determinou para cada provete.

Como a curva de absorção é praticamente linear nas primeiras horas de ensaio, é adequado utilizar como parâmetro representativo deste fenómeno de Absorção capilar, o coeficiente de absorção (S), que equivale ao gradiente da reta obtido por regressão linear da curva de absorção nas primeiras horas (ver Figura 3.50, Figura 3.51, Figura 3.52, Figura 3.53 e Figura 3.54:

$$A = a_0 + S * t^{0,5}$$

3.12

Sendo:

A é a absorção de água por unidade de superfície de betão (mg/mm²);

S é o coeficiente de absorção do material (mg/ (mm².min^{0,5}));

t é o tempo desde o instante em que o provete foi colocado em água (min);

a₀ é a água inicialmente absorvida pelos poros, que estão em contacto com água (mg/mm²).

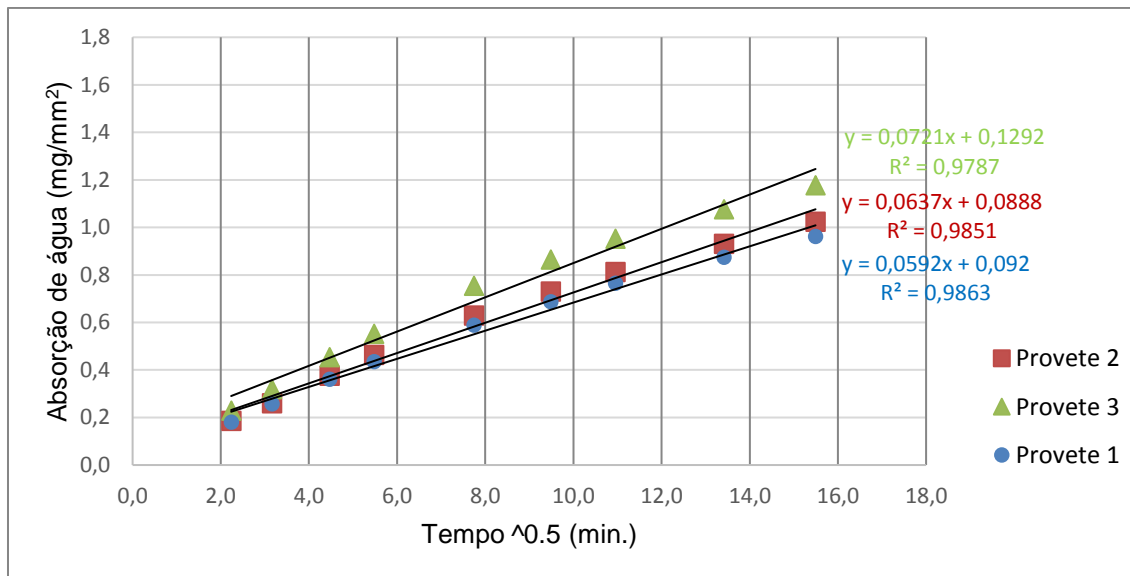


Figura 3.50 - Relação entre a absorção de água e a raiz do tempo nas primeiras 4h dos provetes de CTL1

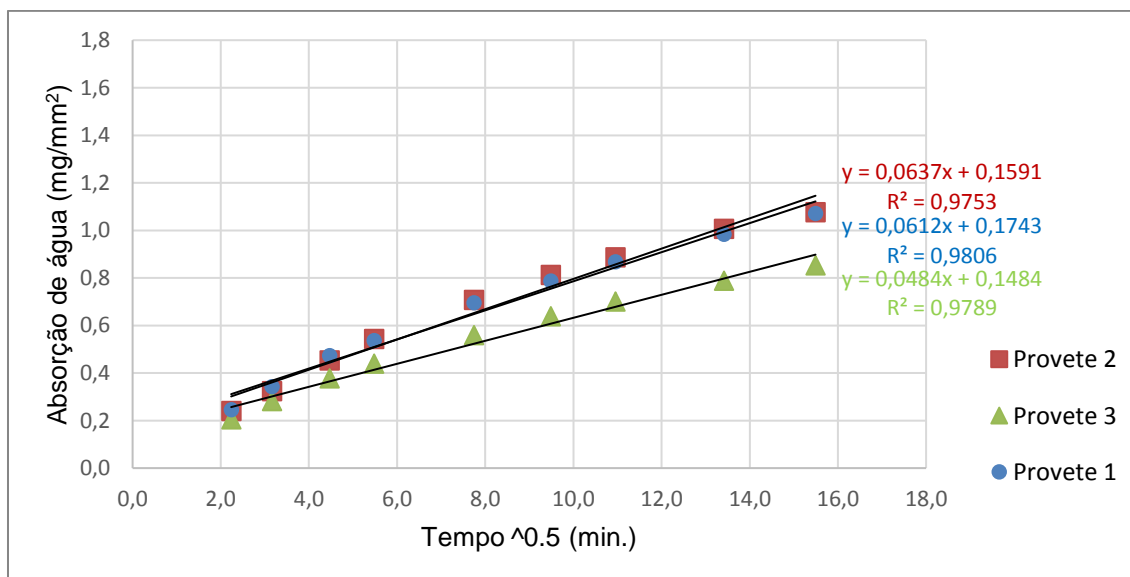


Figura 3.51 - Relação entre a absorção de água e a raiz do tempo nas primeiras 4h dos provetes de CTL2

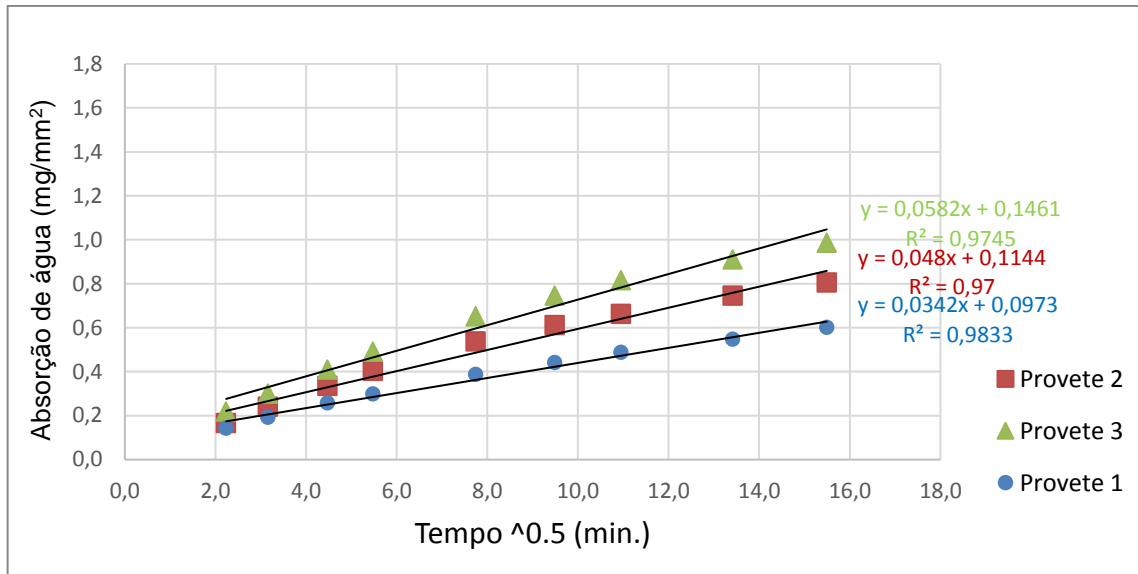


Figura 3.52 - Relação entre a absorção de água e a raiz do tempo nas primeiras 4h dos provetes de CDWs

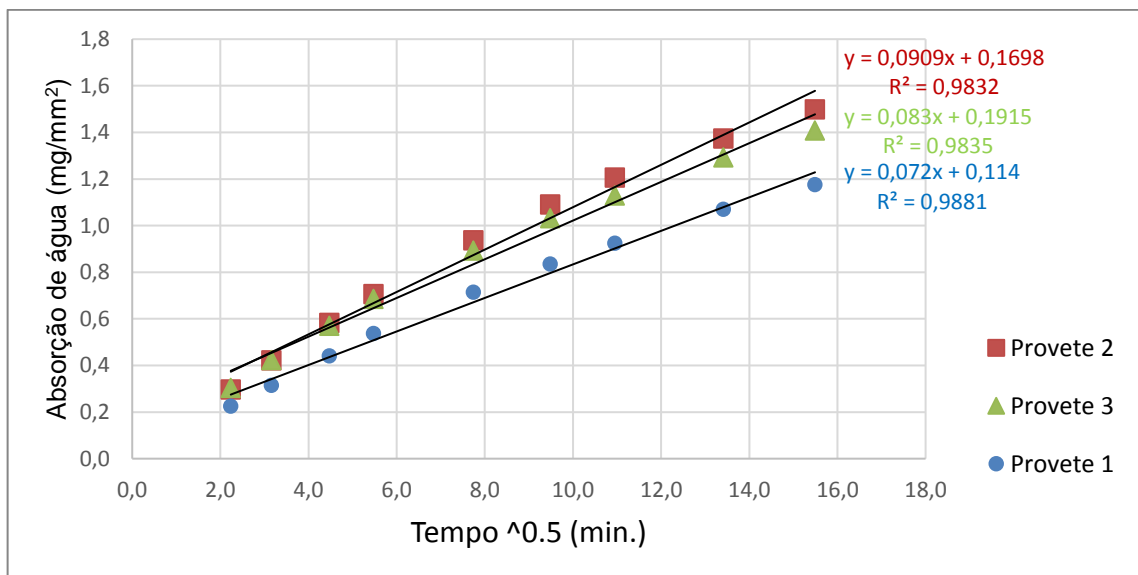


Figura 3.53 - Relação entre a absorção de água e a raiz do tempo nas primeiras 4h dos provetes de 5CDWa

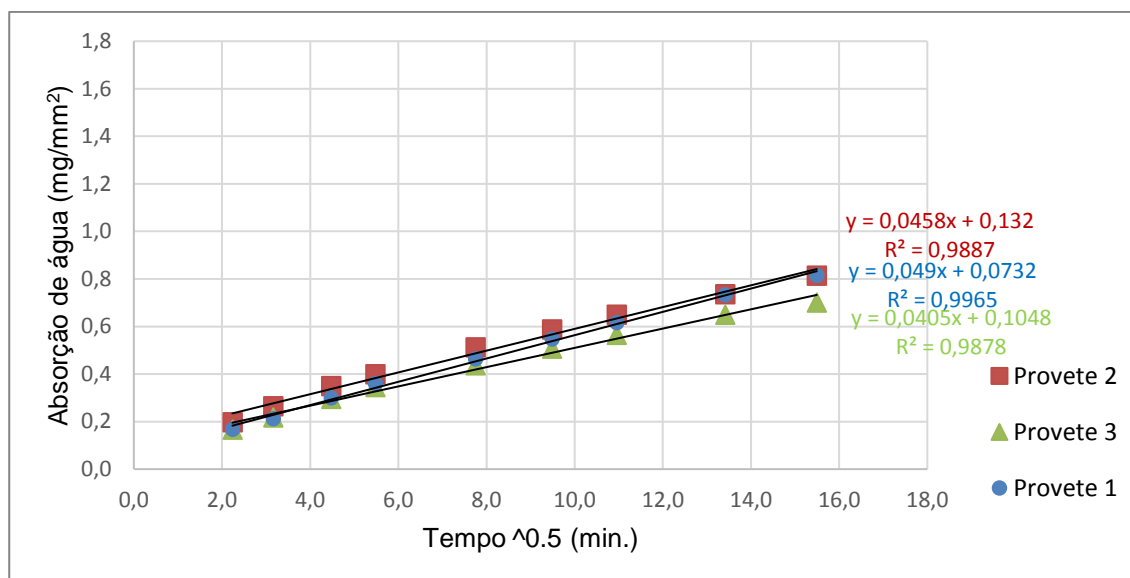


Figura 3.54 - Relação entre a absorção de água e a raiz do tempo nas primeiras 4h dos provetes de CDWs+5CDWa

Os resultados dos coeficientes de absorção de água por capilaridade, S, encontram-se na Tabela 3.25:

Tabela 3.25 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade (cura de 2 meses)

Argamassas	S (mg/ (mm ² .min ^{0,5}))	S _{médio} (mg/ (mm ² .min ^{0,5}))	Desvio Padrão	CV (%)	Desempenho (%)
CTL1	0,06373	0,06499	0,0065	10,10	
	0,07207				
	0,05917				
CTL2	0,06368	0,05774	0,0082	14,20	
	0,04838				
	0,06117				
CDWs	0,04802	0,04681	0,012	25,60	+24
	0,05817				
	0,03425				
5CDWa	0,09091	0,08196	0,0095	11,60	-34
	0,08302				
	0,07195				
CDWs+5CDWa	0,0458	0,04512	0,0043	9,50	+26
	0,04054				
	0,04903				

3.3.4.8.PENETRAÇÃO ACELERADA DE CLORETOS

A presença de cloretos é uma das principais adversidades no que toca à durabilidade de betões, uma vez que a sua aproximação às armaduras é influenciada, na maior parte dos casos, pela permeabilidade da camada de recobrimento. O betão devido à sua alta alcalinidade (pH >12,5) desenvolve uma camada de

passivação que envolve as armaduras e as protege do processo de corrosão. Desta forma, caso haja condições de humidade e oxigénio propícias, e se a penetração de cloretos que ocorre através dos poros existentes no recobrimento seja suficiente para atingir as armaduras, há possibilidade de se destruir a camada de passivação dando-se início da corrosão das armaduras. A penetração de cloretos na camada de recobrimento ocorre quando estes se difundem nos poros do betão, completamente ou parcialmente cheios água, após absorção capilar de água com cloretos, por permeação devido a diferenças de pressão ou por electro emigração por diferenças de potencial eléctrico (Coutinho, 2005).

Para a realização deste ensaio seguiu-se a especificação (LNEC E 463 2004) e foram utilizados provetes cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura que depois da desmoldagem permaneceram na câmara húmida em água durante 2 meses. De seguida, os provetes foram retirados da câmara húmida, limpos para se retirar o excesso de água e colocados numa cúpula vedada (câmara de vácuo) a uma pressão de 1 a 5 kPa, ligada a uma bomba durante 3 horas para o ar ser retirado. Passado este tempo deixou-se entrar solução de hidróxido de cálcio para a cúpula (CaOH_2) até os provetes ficarem totalmente submersos e ao final de 1 hora desligou-se a bomba e mantendo os provetes na solução mais 18 ± 2 horas (Figura 3.55).



Figura 3.55 - Provetes na câmara de vácuo

No dia seguinte, foram colocados os provetes em células, onde a parte moldada (face lisa) ficou em contacto com o reservatório da célula que continha a solução de 10 % de cloreto de sódio (NaCl) e a parte oposta (rugosa) do provete em contacto com o reservatório que continha a solução de hidróxido de sódio (NaOH) (Figura 3.56).



Figura 3.56 - Colocação dos provetes nas células com NaOH e NaCl

Foi então aplicada uma corrente inicial de aproximadamente 30 V para verificar qual o intervalo da nova corrente inicial admissível e com isto, foi possível obter a diferença de potencial necessária a aplicar e a duração do ensaio (quadro 1, (Anexo 2) (LNEC E 463 2004)). Após a aplicação da corrente inicial de 30 V verificou-se ser necessário aplicar uma diferença de potencial de 20 V durante 24 h (Figura 3.57).

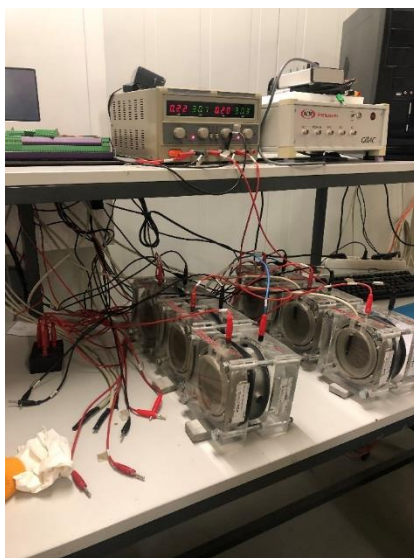


Figura 3.57 - Passagem de corrente elétrica aos provetes

No final, retiraram-se as soluções das células, abriram-se os provetes ao meio através de compressão linear, pulverizaram-se as superfícies recém abertas com solução de nitrato de prata e deixaram-se secar. Quando se tornou perceptível o precipitado de prata, fizeram-se as leituras da frente de penetração de cloretos de acordo com o processo descrito na especificação (LNEC E 463 2004) (Figura 3.58).



Figura 3.58 - Medição da profundidade de penetração de cloretos

Com o resultado das medições das profundidades de cloretos, foi calculado um valor médio (x_d), para que posteriormente fosse possível prosseguir com o cálculo do coeficiente de difusão em regime não estacionário (D_{ns}), dado através da seguinte expressão:

$$D_{ns} = \frac{0.0239(273 + T) * L}{(U - 2) * t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T) * L * x_d}{U - 2}} \right)$$

3.13

Sendo:

D_{ns} é o coeficiente de difusão no estado não estacionário ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$);

U é o valor absoluto da voltagem aplicada (V);

T é o valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica ($^{\circ}\text{C}$);

L é a espessura do provete (mm);

x_d é o valor médio da profundidade de penetração (mm);

t é a duração do ensaio (horas).

São apresentados na Tabela 3.26 os resultados do ensaio realizado assim como os respectivos coeficientes de difusão em regime não estacionário para cada uma das argamassas:

Tabela 3.26 - Coeficientes de difusão dos cloretos (2 meses de cura)

Argamassas	Provetes	X _d (mm)	L (mm)	D _{ns} (x10 ⁻¹² m ² /s)	D _{ns} médio (x10 ⁻¹² m ² /s)	Desvio Padrão	CV (%)	Desempenho (%)
CTL1	1	19,57	50,19	13,04	12,37	0,94	7,61	
	2	17,78	50,17	11,71				
	3	0,00	50,22	0,00				
CTL2	1	20,71	49,66	14,13	14,85	0,67	4,52	
	2	22,07	49,14	14,97				
	3	22,64	49,35	15,45				
CDWs	1	22,86	50,45	15,82	15,12	0,62	4,09	-11
	2	21,21	50,65	14,63				
	3	21,64	50,58	14,93				
5CDWa	1	19,79	50,16	14,38	14,89	0,48	3,23	-9
	2	21,00	50,11	15,33				
	3	20,50	50,30	14,98				
CDWs+5CDWa	1	24,29	49,52	16,98	17,34	0,38	2,21	-27
	2	25,00	50,25	17,74				
	3	24,43	50,18	17,30				

3.3.4.9.RESISTIVIDADE

A resistência elétrica corresponde a uma importante propriedade quanto ao seguimento do estudo realizado, principalmente no que toca à durabilidade. Desta forma, quanto maior a resistividade, maior a oposição da passagem de corrente, e, portanto, mais restritiva será a conectividade dos poros, uma vez que estão saturados. Este ensaio não destrutivo reflete as alterações nas propriedades elétricas do betão, sendo possível caracterizar os materiais cimentícios nas primeiras idades.

A resistividade (ρ) é calculada aplicando a lei de Ohm, como indicado na próxima equação:

$$R = U * I \leftrightarrow R = \rho * \left(\frac{L}{A}\right) \leftrightarrow \rho = \frac{U * A}{L * I}$$

3.14

Sendo:

R é a resistência elétrica (Ω);

U é a diferença de potencial (V);

I é a intensidade de corrente (A);

L é o comprimento do provete (m);

A é a área do eletrodo que está em contato com o provete (m²).

Para a determinação da resistividade das argamassas de substituição em estudo foram realizados dois procedimentos diferentes:

- Resistividade proveniente do ensaio de cloretos;

- Resistividade associada ao método dos dois elétrodos.

3.3.4.10. RESISTIVIDADE PROVENIENTE DO ENSAIO DE CLORETOS

Com o procedimento de ensaio de cloretos explicitado anteriormente foi-nos ainda possível, a partir da diferença de potencial e intensidade de corrente, calcular a resistividade aos 56 dias. Utilizou-se a lei de Ohm (3.14) e procedeu-se aos cálculos, sendo que os resultados são apresentados na próxima tabela (Tabela 3.27):

Tabela 3.27 - Resistividade proveniente do ensaio de cloretos aos 56 dias (2 meses de cura)

Argamassas	Provetes	$\rho(\Omega.m)$	$\rho_m(\Omega.m)$	Desvio Padrão	CV (%)	Desempenho (%)
CTL	1	51,90	56,85	4,88	8,58	
	2	61,65				
	3	56,99				
CTL2	1	50,70	50,93	1,76	3,46	
	2	52,80				
	3	49,30				
CDWs	1	46,29	48,11	2,32	4,82	-11
	2	50,72				
	3	47,32				
5CDWa	1	54,30	55,60	2,00	3,59	+3
	2	57,90				
	3	54,60				
CDWs+5CDWa	1	52,67	51,39	1,43	2,78	-5
	2	51,65				
	3	49,85				

3.3.4.11. RESISTIVIDADE ASSOCIADA AO MÉTODO DOS DOIS ELÉTODOS

Para a realização do ensaio foram moldados os 5 tipos de argamassas em provetes de dimensões 40x40x160 mm, tendo-se colocado, aquando da moldagem, nas extremidades de cada molde prismático, duas redes metálicas, com o objetivo de ensaiar aos 28,56 e 84 dias. Após desmoldagem os provetes colocaram-se na câmara húmida até à primeira data de ensaio (28 dias).

O ensaio de resistividade inicia-se ligando os equipamentos, como apresentado na figura seguinte. No gerador escolheu-se a onda do tipo SIN, selecionou-se a voltagem de ± 10 V, uma frequência de 100 Hz e mediu-se a diferença de potencial em Volts e a intensidade de corrente, em Amperes (Figura 3.59).

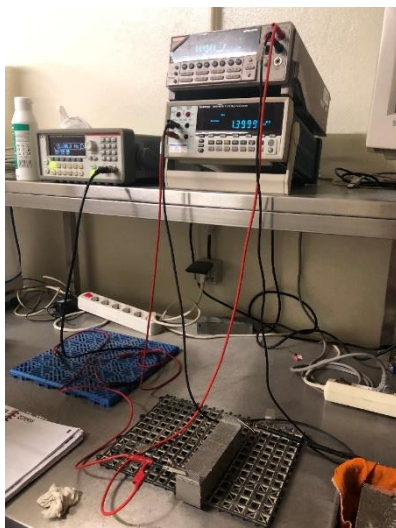


Figura 3.59 - Esquema de ensaio e equipamentos para o ensaio de resistividade

Posto isto, efetuou-se o cálculo da resistividade utilizando-se igualmente, a lei de Ohm (3.14), onde os resultados dos provetes aos 28,56 e 84 dias encontram-se nas tabelas seguintes (Tabela 3.28, Tabela 3.29 e Tabela 3.30):

Tabela 3.28 - Resistividade associada ao método dos dois elétrodos aos 28 dias

Argamassas	Provetes	$\rho(\Omega.m)$	$\rho_m(\Omega.m)$	Desvio Padrão	CV (%)	Desempenho (%)
CTL 1	1	49,36	48,63	0,83	1,70	
	2	47,73				
	3	48,79				
CTL 2	1	47,46	47,64	0,34	0,72	
	2	48,03				
	3	47,43				
CDWs	1	40,87	39,69	1,03	2,59	-18
	2	38,96				
	3	39,26				
5CDWa	1	49,07	49,35	0,47	0,96	+3
	2	49,08				
	3	49,90				
CDWs+5CDWa	1	43,10	43,96	0,76	1,73	-9
	2	44,56				
	3	44,21				

Tabela 3.29 - Resistividade associada ao método dos dois elétrodos aos 56 dias

Argamassas	Provetes	$\rho(\Omega.m)$	$\rho_m(\Omega.m)$	Desvio Padrão	CV (%)	Desempenho (%)
CTL 1	1	52,55	50,9	1,58	3,11	
	2	49,39				

	3	50,76				
CTL 2	1	49,50	49,68	0,20	0,41	
	2	49,90				
	3	49,64				
CDWs	1	48,29	46,50	1,57	3,38	-8
	2	45,36				
	3	45,85				
5CDWa	1	57,04	56,27	0,67	1,19	+12
	2	55,80				
	3	55,98				
CDWs+5CDWa	1	51,25	51,88	0,73	1,40	+3
	2	52,68				
	3	51,73				

Tabela 3.30 - Resistividade associada ao método dos dois elétrodos aos 84 dias

Argamassas	Provetes	$\rho(\Omega.m)$	$\rho_m(\Omega.m)$	Desvio Padrão	CV (%)	Desempenho (%)
CTL 1	1	55,41	55,09	1,09	1,98	
	2	53,87				
	3	55,98				
CTL 2	1	55,33	55,24	0,64	1,15	
	2	55,83				
	3	54,56				
CDWs	1	48,78	48,92	1,33	2,72	-11
	2	47,67				
	3	50,32				
5CDWa	1	60,59	60,69	0,32	0,52	+10
	2	61,05				
	3	60,44				
CDWs+5CDWa	1	55,55	56,12	0,84	1,49	+2
	2	57,08				
	3	55,73				

A Figura 3.60 apresenta os valores da resistividade média associada ao método dos dois elétrodos para cada uma das 5 argamassas, para os 28, 56 e 84 dias:

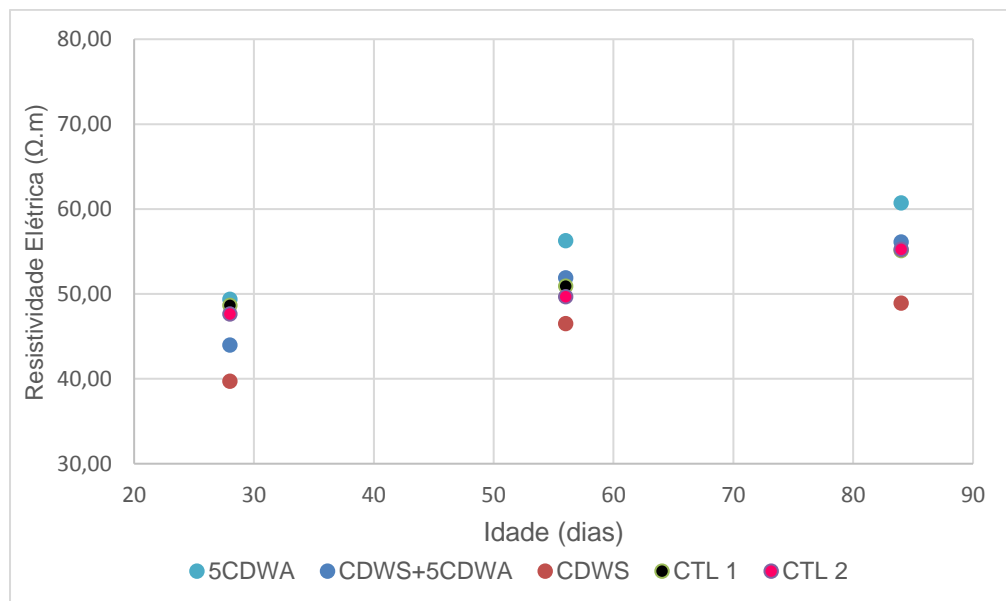


Figura 3.60 - Resistividade média pelo método dos 2 elétrodos aos 28,56 e 84 dias

3.3.4.12. REAÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA

O ataque pelos álcalis consiste na resposta dada pelos minerais ao desequilíbrio com o meio em que estão inseridos (meio com pH muito elevado, muitas vezes superior a 13). Estes acontecimentos originam reações, denominadas por reações álcali-agregado e são do tipo sólido/líquido, mais especificamente agregado/solução intersticial dos poros do betão. As reações álcali-agregado são constituídas por reações álcali-silicato, álcali-carbonato e álcali-sílica, onde a última é a mais frequente ocorrer e que passamos a especificar.

A reação álcali-sílica acontece no betão entre iões alcalinos de sódio e potássio (K^+ e Na^+) e os iões de hidróxido (OH^-), presentes na solução intersticial, e a sílica (SiO_2) dos agregados, formando um gel sílico-alcalino, que é fortemente expansivo em determinadas condições.

A solução intersticial resulta da hidratação do cimento Portland e movimenta-se nas fendas e poros do betão contendo os hidróxidos de cálcio, de potássio e sódio. Desta forma, a grande parte de hidróxido de cálcio (constituído na hidratação do cimento) aparece na forma cristalina (portlandite), enquanto a parte de hidróxidos alcalinos (potássio e sódio) apresentam-se na solução.

Relativamente ao gel formado, é de composição química variável e constituído por silicatos alcalinos de potássio e sódio, com quantidades variáveis de água e cálcio que migra pelas microfissuras e porosidade do betão podendo originar exsudações à superfície do betão. Do mesmo modo, este gel ao expandir, poderá originar tensões no interior do betão que consequentemente causarão fissuração (Begonha, 2018; Moreira, 2014).

Assim, sumariamente, para que a reação álcali-sílica se verifique, conforme a especificação do (LNEC E 461 2007) é necessário que ocorra simultaneamente as seguintes condições:

- Alcalinidade suficiente nos poros do betão;
- Teor crítico de sílica reativa;
- Ambiente favorável (água em quantidade suficiente, humidade, ciclos de molhagem/secagem).

As medidas preventivas no combate a este tipo de reação que se poderão aplicar seguindo também a especificação do (LNEC E 461 2007), são as seguintes:

- Controlar a alcalinidade da solução dos poros do betão;
- Evitar a presença de um teor crítico de sílica reativa;
- Controlar a humidade e manter o betão num estado relativamente seco;
- Modificar as propriedades do gel formado de modo a ser não expansivo.

De forma a analisar os efeitos deste ataque nas argamassas com substituição em estudo, foi realizado o ensaio de procedimento retratado na norma (ASTM C1260 2014), que consistiu primeiramente, na moldagem de 3 provetes de dimensões 25x25x285 mm para cada tipo de argamassas, com a colocação de pernos nas extremidades cautelosamente para ficarem bem envolvidos. A desmoldagem, foi feita cuidadosamente de igual forma para que os pernos se mantivessem presos e salientes o suficiente para proceder com a medição. Assim, após desmoldagem em todos os provetes foram identificadas as faces e orientações com um marcador para facilitar as leituras (Figura 3.61). Posto isto, colocaram-se em caixas com água até ficarem submersos e seguidamente na estufa a 80°C durante 24 horas (Figura 3.62).



Figura 3.61 - Provetes ASR da argamassa CDWs

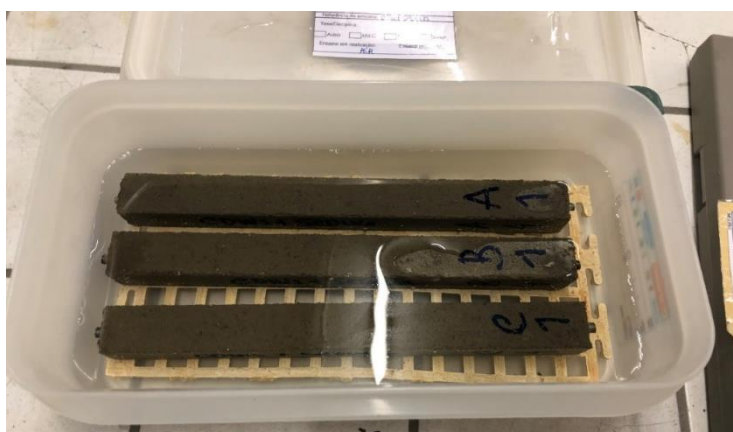


Figura 3.62 - Colocação dos provetes ASR numa caixa com água

Passadas as 24 horas em estufa, tiraram-se os provetes da caixa e limpavam-se com auxílio de um pano, retirando-se o excesso de água, incidindo na zona dos pernos para que não afetasse a primeira leitura

(leitura 0). A leitura é realizada primeiramente introduzindo a barra Invar para zerar o defletómetro e só depois, é que se coloca o provete devidamente seco no defletómetro para medir a extensão sendo que este processo tem que ser rápido não podendo demorar mais de 15 segundos (Figura 3.63). As leituras seguintes realizaram-se a 3, 8, 10, 16, 22 e 28 dias a contar da moldagem, de igual forma à mencionada anteriormente, no entanto, substituiu-se a água que estava na caixa por uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), colocando-se também na estufa a 80°C após cada medição e adicionando sempre solução para que os provetes se mantivessem sempre submersos.



Figura 3.63 - Medição do comprimento real de um dos provetes CTL2 de ASR com defletómetro

Terminando as leituras e com os valores dos comprimentos reais de cada face dos provetes referentes a cada dia de medição, utilizou-se a fórmula seguinte para o cálculo da expansão de cada argamassa:

$$Exp (\%) = \frac{LP_t - L_0}{250} * 100$$

3.15

Sendo:

LP_t é a média aritmética do comprimento real de cada provete em cada dia de medição (mm);

L_0 é a média aritmética do comprimento da leitura 0 (mm);

250 é a distância entre pernos (mm).

Os resultados das expansões álcalis sílica aos 16 dias a contar da moldagem encontram-se na Tabela 3.31, uma vez que nesta data já é notória a diferença de expansão entre provetes:

Tabela 3.31 - Expansões ASR ao fim de 16 dias (cura acelerada)

Argamassas	Dia	Provete	Expansão	Expansão média	Desvio Padrão	Desempenho (%)
			(%)	(%)		
CTL1	15*	A	0,069	0,07	0,0040	
		B	0,074			
		C	0,066			
CTL2	16	A	0,087	0,09	0,0010	
		B	0,085			
		C	0,086			
CDWs	16	A	0,070	0,07	0,0031	+13
		B	0,072			
		C	0,076			
5CDWa	16	A	0,080	0,08	0,0029	0
		B	0,085			
		C	0,080			
CDWs+5CDWa	16	A	0,044	0,04	0,0012	+50
		B	0,044			
		C	0,042			

*Medição realizada após 15 dias uma vez que aos 16 foi feriado.

Na figura seguinte (Figura 3.64), encontra-se a representação gráfica das expansões dos provetes comparativamente aos controlos, para todas as idades:

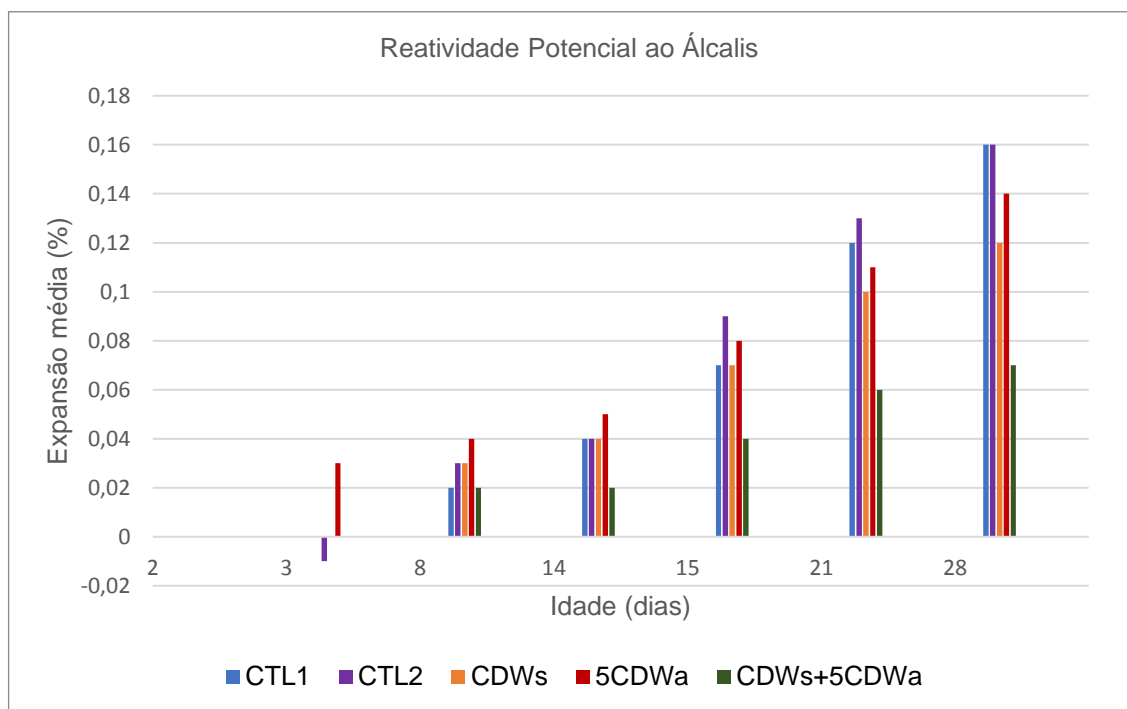


Figura 3.64 - Representação gráfica das expansões ASR dos provetes comparativamente aos controlos, para todas as idades

3.3.4.13. RESISTÊNCIA AO ATAQUE POR SULFATOS

Uma das maiores causas de degradação e risco de agressão química ao betão é o ataque pelos sulfatos. Este ataque resulta da reação química entre os iões sulfato (SO_4^{2-}) e os aluminatos do betão (aluminatos de cálcio hidratados do cimento ou alumina reativa dos agregados (Al_2O_3)) originando a formação de etringite (sulfoaluminato de cálcio hidratado ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)) e de algum gesso (sulfato de cálcio bi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)). A formação de etringite é fortemente expansiva causando fendilhação irregular na estrutura, menos desenvolvida no interior que à superfície e, consequentemente facilitando a entrada de novos agentes agressivos, acelerando o processo de deterioração. Posto isto, em algumas circunstâncias poderá ocorrer degradação em toda a massa do betão, com consequentes perdas notáveis de resistência (Begonha, 2018; Moreira, 2014).

Os fatores que mais influenciam a expansão verificada são:

- Condições de exposição: severidade do ataque-quantidade de substância agressiva (SO_4^{2-});
- Acessibilidade: “permeabilidade” do betão-velocidade do transporte;
- Suscetibilidade do betão: tipo de cimento-quantidade de substância reativa (Al_2O_3);
- Quantidade de água disponível.

Caso a sua origem seja externa, isto significa que provém:

- Dos solos e água subterrânea;
- Da água do mar;
- Poluição urbana ou industrial (águas das chuvas ácidas com ácido sulfúrico (H_2SO_4)).

Desta forma, para que ocorram as reações sulfáticas internas é fundamental que sejam verificadas em simultâneo as próximas condições (segundo (LNEC E 461 2007)):

- Temperaturas elevadas do betão jovem;
- Teores críticos de álcalis, SO_3 e C_3A do cimento;
- Água em quantidade suficiente;
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na solução dos poros do betão em quantidade suficiente.

O ataque por sulfatos poderá ser causado também por origens externas, quando os iões sulfatos resultantes do ambiente exterior ou dos constituintes do betão, interagem com os compostos da pasta de cimento hidratado Portland (aluminato tricálcico do cimento hidratado ou com a alumina do agregado), formando expansões, dos quais se destaca a etringite, o gesso e, por vezes, a taumasite. Estas reações são de tal modo expansivas que causam tensões intensas e fissuração irregular do betão, facilitando a penetração posterior de mais substância agressiva e progressão da deterioração. O volume final pode alcançar mais do dobro do inicial (Coutinho, 2001).

A maior parte das normalizações limitam o teor de sulfatos da água de amassadura, do conjunto dos constituintes do betão e impõe a utilização de cimentos especiais em meios sulfatados (Begonha, 2018; Moreira, 2014).

Foi então realizado o ensaio de resistência ao ataque por sulfatos de acordo com a especificação (LNEC E 462 2004). Iniciou-se com a moldagem de 6 provetes de dimensão $20 \times 20 \times 160$ mm para cada uma das 5 argamassas com a colocação de pernos nas extremidades cautelosamente para ficarem bem envolvidos. A desmoldagem foi feita passadas 24 horas, de forma igualmente cuidadosa, para que os pernos se mantivessem presos e salientes o suficiente. Posto isto, identificaram-se e numeraram-se sequencialmente todas as faces dos provetes (Figura 3.65) e colocaram-se fechados numa solução saturada de hidróxido de cálcio durante 28 dias (74,1 g de hidróxido de cálcio dissolvidos em 1000 ml de água destilada) (Figura 3.66).

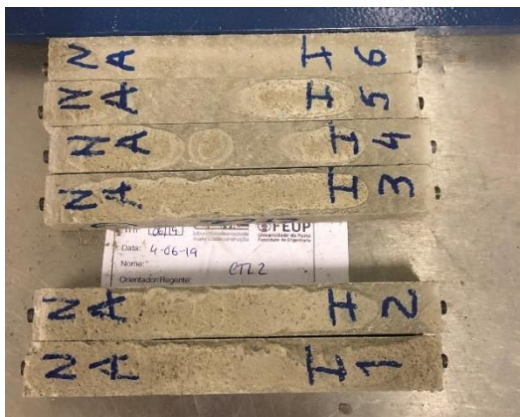


Figura 3.65 - Provete de resistência ao ataque por sulfatos numerados e identificados



Figura 3.66 - Provete imerso na solução saturada de CaOH

Passados os 28 dias, retiraram-se todos os provetes da solução saturada de hidróxido de cálcio, removeu-se o excesso de água com o auxílio de um pano húmido, incidindo nos pernos, calibrou-se o defletómetro com a barra Invar e procedeu-se à primeira medição (leitura 0). A medição realizou-se colocando cada provete no aparelho de medição e repetindo-se o procedimento com o provete invertido. Registaram-se os valores para cada face na direção normal e invertida, sendo que para o cálculo da expansão realiza-se a média destes 8 valores por provete. Após as leituras, colocaram-se de imediato os provetes de numeração ímpar (1, 3 e 5) num recipiente com a solução de hidróxido de cálcio e os provetes de numeração par (2, 4 e 6) num recipiente com a solução de sulfato de sódio (23,67 g de sulfato de sódio anidro (Na_2SO_4) dissolvidos em 1000 ml de água destilada) (Figura 3.67).

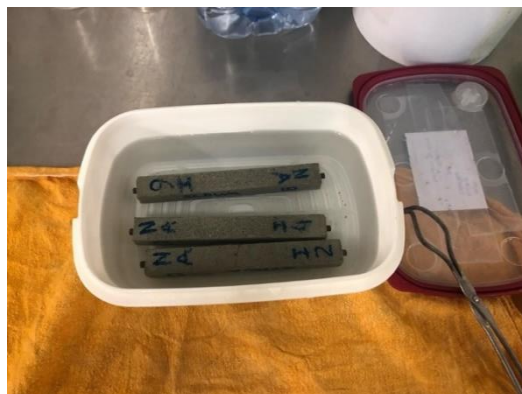


Figura 3.67 - Provete imersos na solução saturada de Na_2SO_4

Assim, os recipientes de ambas as soluções foram colocados na câmara húmida e de 15 em 15 dias retirados para novas leituras até às 26 semanas, sendo que a solução de sulfato de sódio foi renovada após cada leitura durante todo o período.

Por fim, realizou-se o cálculo da expansão com auxílio das seguintes expressões:

$$Exp_{Ca(OH)_2} = \frac{(LP_t - LI_t) - L_0}{1600} \quad 3.16$$

$$Exp_{Na_2SO_4} = \frac{(LP_t - LI_t) - L_0}{1600} \quad 3.17$$

$$Exp_{Ca(OH)_2} = \frac{Exp(1) + Exp(3) + Exp(5)}{3} \quad 3.18$$

$$Exp_{Na_2SO_4} = \frac{Exp(2) + Exp(4) + Exp(6)}{3} \quad 3.19$$

$$Expansão = Exp_{Na_2SO_4} - Exp_{Ca(OH)_2} \quad 3.20$$

Sendo:

LP_t é a média do comprimento em cada dia de medição e de cada provete (μm);

LI_t é a leitura média do padrão de Invar (μm);

L_0 é a média do comprimento da leitura zero de cada provete menos a leitura zero da barra Invar (μm).

Na Tabela 3.32 apresentam-se os resultados das expansões médias finais das argamassas ao longo de 26 semanas de ensaio, bem como os respetivos desempenhos:

Tabela 3.32 - Expansões médias (%) resultantes do ataque por sulfatos ao longo de 26 semanas (cura de 28 dias numa solução saturada de hidróxido de cálcio)

Semanas	CTL1	CTL2	CDWs	5CDWa	CDWs+5CDWa
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,005	0,012	0,000	0,007
4	0,001	0,010	0,019	0,007	0,013
6	0,008	0,011	0,030	0,008	0,028
8	0,014	0,017	0,043	0,010	0,036
10	0,012	0,020	0,058	0,012	0,049
12	0,020	0,024	0,078	0,017	0,063
14	0,021	0,028	0,111	0,019	0,082
16	0,027	0,032	0,157	0,028	0,105
18	0,028	0,041	0,198	0,034	0,128
20	0,036	0,045	0,259	0,044	0,157
22	0,044	0,057	0,343	0,065	0,186
24	0,054	0,062	0,454	0,085	0,230
26	0,062	0,085	0,564	0,112	0,281
Desempenho (%)			-666	-51	-281

Na Figura 3.68 representa-se a evolução das expansões resultantes do ataque por sulfatos no decorrer do tempo de duração do ensaio:

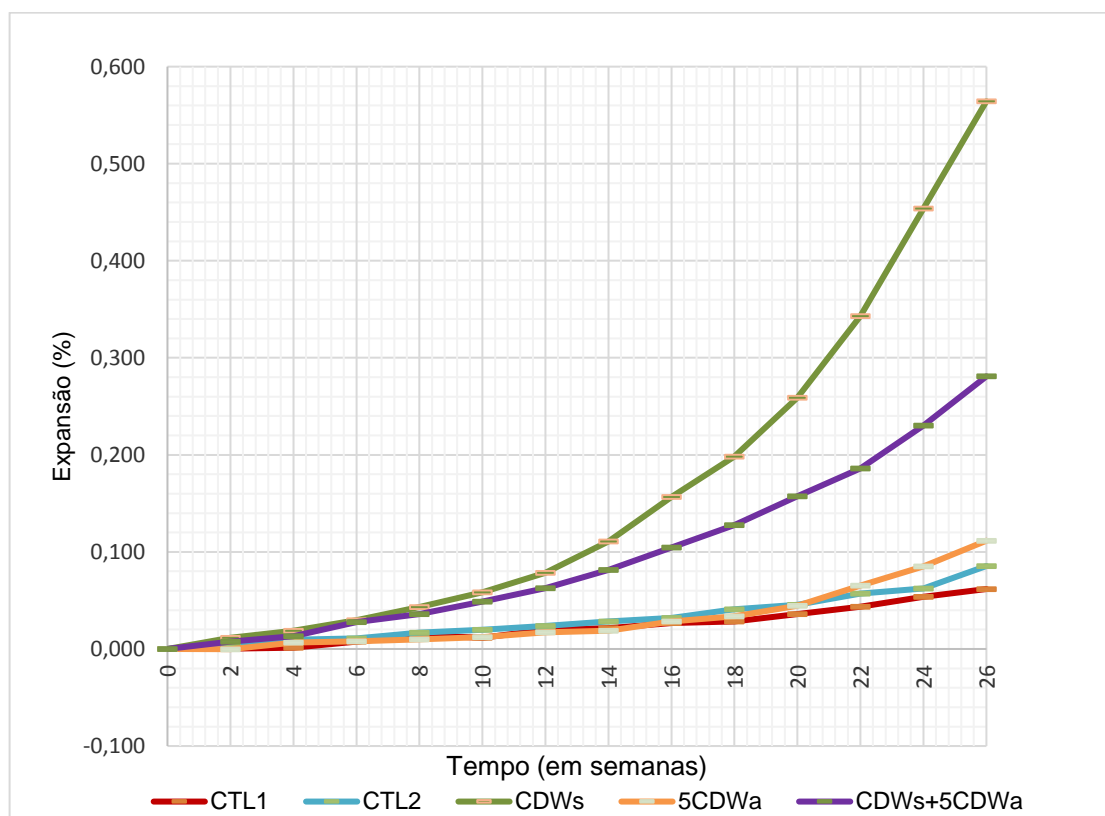


Figura 3.68 - Evolução da expansão média devida ao ataque por sulfatos nas argamassas

4

DISCUSSÃO E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

4.1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo tem como objetivo a discussão dos resultados obtidos nos ensaios apresentados no capítulo anterior, assim como, a sua comparação com resultados de estudos idênticos realizados como dissertações na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. A utilização destes estudos como meio de comparação de (Pereira, 2015), (Rocha, 2016), (Alonso, 2016) e (Silva, 2016) deveu-se ao facto de seguirem um programa experimental idêntico e o mesmo tipo de resíduo, embora o RCD utilizado por (Rocha, 2016) seja de uma origem diferente.

4.2. GRANULOMETRIA A LASER

Para que seja possível a substituição parcial do cimento pelos resíduos, a finura obtida após o seu processo de moagem deveria ser superior à do cimento, como mencionado no ponto 3.2.5.3.

Os valores das dimensões características ($d(10)$, $d(50)$ e $d(90)$) e diâmetro médio ($D_{\text{médio}}$) dos materiais utilizados nos diferentes estudos, apresentam-se na Tabela 4.1, sendo que correspondem às dimensões obtidas após a moagem da quantidade total utilizada no procedimento experimental.

Tabela 4.1 - Dimensões características do cimento e do RCD utilizados nos diferentes programas experimentais

Autor e Ano do estudo	Amostra	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)	Dmédio (μm)
Presente estudo 2019	CEM I 42,5 R	1,15	14,85	41,65	18,56
	Rejeitado de CDWs passado no #0,063mm	2,10	17,27	49,40	21,89
	CDWa	1,26	6,55	16,51	9,24
(Alonso, 2016; Silva, 2016)	CEM I 42,5 R	0,88	7,80	24,97	10,66
	CDW 120 h	0,74	4,49	17,91	7,19
(Rocha, 2016)	CEM I 42,5 R	0,93	8,45	27,12	11,52
	CDWg (Amostra 1) 80 h	1,06	5,94	29,39	10,77
	CDWg (Amostra 2) 76 h	0,88	6,03	25,03	9,69
(Pereira, 2015)	CEM I 42,5 R	1,22	9,94	27,95	12,57
	CDWf	0,82	4,54	16,34	6,85

Conforme o indicado na Tabela 4.1, relativamente ao presente estudo pode-se verificar em primeiro lugar que o cimento utilizado é menos fino do que os utilizados nos outros estudos embora todos do mesmo tipo. No estudo em curso a granulometria das partículas do CDWa é menor que a do cimento (como pretendido) sobretudo para as partículas de maior dimensão. De facto 90%, das partículas de cimento têm dimensão inferior a 41,65 μm , enquanto que do CDWa 90% das partículas possuem um diâmetro menor que 16,51 μm . Para os dois materiais a relação entre os respetivos valores de D90 é cerca de 2,5 vezes e para o D50 uma relação cerca de 2,6 vezes. Considerando os dois materiais, os valores de D10 são equivalentes e, portanto, a parte mais fina (10%) do cimento e do CDWa tem partículas com diâmetros semelhantes.

Esta relação desejada de finura verifica-se também para os outros estudos, embora com diferenças menos acentuadas, exceto no caso do estudo de (Rocha, 2016) onde apenas se conseguiu atingir uma granulometria semelhante à do cimento. De facto, o equipamento de moagem utilizado naquele estudo foi um moinho de bolas que operou durante dezenas de horas. Nos restantes estudos utilizou-se um moinho planetário, muito mais eficaz. Como sugerido em (Rocha e Coutinho, 2018) sendo o grau de finura crítico para a eficácia da adição é aconselhável que a razão entre os diâmetros médios seja superior a 2, o que se verificou no caso presente.

Na realidade a moagem é muito importante no sentido de maximizar a finura e assim obter uma matriz de material hidratado mais densa dificultando assim a entrada dos agentes ambientais agressivos e consequentemente contribuindo para a durabilidade do betão. Note-se que a moagem é sempre um processo dispendioso pelo que será sempre importante estimar o custo/benefício desta operação à escala real.

4.3. ENSAIOS LABORATORIAIS REALIZADOS

4.3.1. MASSA VOLÚMICA DOS AGREGADOS

Os resultados da massa volúmica de todos os estudos em questão apresentam-se na próxima tabela (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 - Massas volúmicas determinadas para o cimento e para as diferentes amostras de RCD

Autor e Ano do estudo	Material	Massa Volúmica (g/cm^3)
Presente estudo	CEM I 42,5 R	3,11
	CDWa	2,61
(Alonso, 2016; Silva, 2016)	CEM I 42,5 R	3,08
	CDW	2,62
(Rocha, 2016)	CEM I 42,5 R	3,10
	CDWg (Amostra 1)	2,62
	CDWg (Amostra 2)	2,61
(Pereira, 2015)	CEM I 42,5 R	3,10
	CDWf	2,60

A partir da determinação da massa volúmica do cimento CEM I 42,5 R foi possível verificar que se encontrava em bom estado de utilização, uma vez que, o valor obtido no programa experimental capítulo

3 para o cimento foi de $3,11 \text{ g/cm}^3$ e, para o cimento Portland, o valor desta grandeza deve ser superior a $3,05 \text{ g/cm}^3$, indicando que não está parcialmente hidratado. Para o CDWa a massa volúmica é de $2,61 \text{ g/cm}^3$, que se encontra dentro dos limites de acordo com a declaração de desempenho fornecida pela RCD - Resíduos de Construção e Demolição SA ($2,64 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$).

Relativamente aos outros casos de estudos não houve diferenças significativas nos resultados, sendo que as mínimas variações poderão ter sido causadas pela heterogeneidade da composição dos resíduos de construção.

4.3.2. BLAINE

Com a realização do Blaine foi possível obter os resultados das superfícies específicas apresentados na Tabela 4.3. Note-se que, para o cimento CEM I 42,5 R do presente trabalho foi utilizado o resultado da superfície específica do ensaio Blaine do ano anterior, realizado pela equipa de investigação, visto que era do mesmo lote.

Tabela 4.3 - Superfície específica para o cimento e as diferentes amostras de RCD

Autor e Ano do estudo	Material	Superfície específica (cm^2/g)
Presente estudo	CEM I 42,5 R	3737
	CDWa	10440
(Alonso, 2016; Silva, 2016)	CEM I 42,5 R	4246
	CDW	8439

Analisando os resultados da superfície específica Blaine relativamente aos cimentos embora todos da mesma proveniência e tipo (SECIL, CEM I 42,5 R), correspondem a lotes diferentes e segundo a ficha técnica o valor médio será de $4121 \text{ cm}^2/\text{g}$. Observa-se, como seria de esperar, que o cimento usado por (Silva, 2016) e (Alonso, 2016) era mais fino, como provado pela granulometria (Tabela 4.1) e apresenta maior superfície específica. Comparando os valores do Blaine do cimento com os da adição verifica-se tal como anteriormente, que materiais mais finos correspondem a valores da superfície específica maiores. Em relação ao RCD usado como adição, da mesma origem, mas também de lotes diferentes, embora a finura representada pelas curvas granulométrica seja ligeiramente maior que para o caso dos estudos de (Silva, 2016) e (Alonso, 2016) com uma dimensão do grão médio de cerca de 7 microns comparado com 9 microns no estudo presente, os correspondentes resultados da superfície específica são contraditórios. De facto, para uma adição mais fina seria de esperar uma superfície específica maior. No entanto verifica-se o contrário. Este facto estará ligado com as limitações do próprio ensaio que foi preconizado para cimentos Portland há cerca de 80 anos. O método Blaine embora robusto e fácil de executar, é criticado por alguns investigadores sobretudo por partir da consideração de que as partículas são esferas sólidas da mesma dimensão e ser um método semi-empírico que depende do operador (Wang, Ishida e Gu, 2018)

4.3.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Apresentam-se na próxima Tabela 4.4 alguns dos resultados da resistência à compressão de argamassas de diferentes estudos, assim como os desempenhos e desvio padrão.

Tabela 4.4 - Resistências médias à compressão, desempenhos e desvio padrão para todas as argamassas

		Autor e Ano do estudo	Argamassas (MPa)			
			CTL (média CTL1 e CTL2)	CDWs	5CDWa	CDWs+5 CDWa
RC aos 28 dias	Resultado	Presente Estudo	55,0	48,2	44,6	34,8
	Desvio Padrão		1,1	1,0	0,9	2,8
	Desempenho (%)		-	-12	-19	-37
RC aos 84 dias	Resultado		65,6	54,7	53,0	35,9
	Desvio Padrão		1,1	1,6	1,0	2,1
	Desempenho (%)		-	-17	-19	-45
10CDW						
RC aos 28 dias	Resultado	(Alonso, 2016; Silva, 2016)	43,6			
	Desvio Padrão		0,4			
	Desempenho (%)		-12			
RC aos 90 dias	Resultado		48,8			
	Desvio Padrão		0,9			
	Desempenho (%)		-15			
CDW _{g5} CDW _{g10}						
RC aos 28 dias	Resultado	(Rocha, 2016)	49,4 45,7			
	Desvio Padrão		0,4 1,7			
	Desempenho (%)		-9 -16			
RC aos 90 dias	Resultado		55,5 54,1			
	Desvio Padrão		1,8 1,7			
	Desempenho (%)		-8 -10			
CDW _{f5} CDW _{f10}						
RC aos 28 dias	Resultado	(Pereira, 2015)	42,3 38,1			
	Desvio Padrão		1,6 1,3			
	Desempenho (%)		-9 -18			
RC aos 90 dias	Resultado		51,3 46,8			
	Desvio Padrão		0,8 0,7			
	Desempenho (%)		-4 -12			

De acordo com a Tabela 4.4, é possível verificar que as resistências aumentam com o decorrer do tempo, como seria de esperar, e, são sempre superiores para as argamassas de controlo relativamente às argamassas de substituição.

Para se poder visualizar de uma forma mais abrangente todos estes resultados repetiram-se os resultados apenas do desempenho na Tabela 4.5. Observa-se então, que de uma maneira geral usando RCD para substituir 5 ou 10% do cimento, origina um desempenho até 19% mais baixo. O mesmo se verifica para

o uso de RCD para substituir totalmente a areia, que igualmente resulta numa perda de desempenho abaixo de 19%.

Já para a combinação de materiais CDWs e CDWa isto é, a substituição de toda a areia e parte do cimento por resíduos de construção e demolição parece criar uma sinergia negativa e o desempenho é altamente afetado com reduções atingindo os 45%.

Tabela 4.5 - Desempenhos das resistências mecânicas à compressão para todas as argamassas

	Autor e Ano do estudo	CTL (média CTL1 e CTL2)	CDWs	5CDWa	CDWs+5CDWa
28d	Presente Estudo	-	-12	-19	-37
84d		-	-17	-19	-45
		CTL		10CDW	
28d	(Alonso, 2016; Silva, 2016)	-		-12	
90d		-		-15	
		CTL		CDWg5	CDWg10
28d	(Rocha, 2016)	-		-9	-16
90d		-		-8	-10
		CTL		CDWf5	CDWf10
28d	(Pereira, 2015)	-		-9	-18
90d		-		-4	-12

4.3.4. RESISTIVIDADE

Analisam-se em seguida os resultados da resistividade para os 56 dias obtida segundo os dois métodos, associada ao ensaio de penetração de cloretos e através dos dois elétrodo. Como se pode observar na Tabela 4.6, os resultados são semelhantes para cada tipo de argamassa, exceto para o CTL1. Note-se que esta diferença praticamente não se altera caso se opte por eliminar o resultado correspondente ao provete 3, cujo coeficiente de difusão não foi possível calcular.

Tabela 4.6 - Resistividades provenientes dos dois métodos de ensaio aos 56 dias

Argamassas	ρ_m ($\Omega.m$) associada aos cloretos	ρ_m ($\Omega.m$) proveniente do método dos 2 elétrodo
CTL 1	56,85 \pm 4,88	50,90 \pm 1,58
CTL 2	50,93 \pm 1,76	49,68 \pm 0,20
CDWs	48,11 \pm 2,32	46,50 \pm 1,57
5CDWa	55,60 \pm 2,00	56,27 \pm 0,67
CDWs+5CDWa	51,39 \pm 1,43	51,88 \pm 0,73

Analisando agora os desvio-padrão dos dois métodos observa-se que a variação é muito maior no método associado ao ensaio de cloretos (1.43 a 4.88) comparando com o método dos dois elétrodo (0.20 a 1.58), pelo que parece que se podem considerar mais assertivos estes últimos. Observando então,

apenas os resultados da resistividade aos 56 dias pelo método dos dois elétrodos, poderá se inferir que os resultados da resistividade, devido à sua proximidade, não permitem distinguir as argamassas com clareza, exceto para a argamassa 5CDWa em que o resultado é ligeiramente melhor.

Os resultados obtidos de resistividade associada apenas ao método dos 2 elétrodos para as argamassas estudadas neste trabalho e nos estudos anteriores para 84 e 180 dias apresentam-se na Tabela 4.7, assim como os valores do desempenho.

Tabela 4.7 - Resistividade e Desempenhos provenientes do método dos 2 elétrodos para todas as argamassas a idades diferentes

Autor e Ano do estudo	Argamassas	Idade (dias)	Resistividade (método 2 elétrodos) (p.m)	Desempenho (%)
Presente Estudo	CTL (média CTL1 e CTL2)	84d	55,17	-
	CDWs		48,92	-11
	5CDWa		60,69	10
	CDWs+5CDWa		56,12	2
(Alonso, 2016; Silva, 2016)	CTL	84d	43,50	-
	10CDW		41,70	-4
(Rocha, 2016)	CTL	180d	53,10	-
	CDWg5		49,70	-6
	CDWg10		46,40	-13

Como se pode observar para argamassas de substituição do cimento verifica-se tanto um ligeiro aumento da resistividade (5CDWa) como uma ligeira redução nos outros casos. Na realidade os resultados são semelhantes e não permitem objetivamente distinguir as argamassas.

4.3.5. CARBONATAÇÃO

Do ensaio de carbonatação acelerada resultaram os resultados das profundidades de carbonatação ($h_{\text{médio}}$) apresentados na tabela seguinte (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 - Profundidade de carbonatação média para todas as argamassas

Autor e Ano do estudo	Argamassas	$h_{\text{médio}}$ (cm) AutoCAD	D(%)	$h_{\text{médio}}$ (cm) (LNEC E 391 1999)	D(%)
Presente trabalho 9 semanas de cura 2 semanas a HR50% 5 semanas em CO ₂	CTL (média CTL1 e CTL2)	0,21	-	0,15	-
	CDWs	0,27	-32	0,23	-59
	5CDWa	0,35	-71	0,29	-100
	CDWs+5CDWa	0,35	-71	0,27	-86
(Silva, 2016) 5 semanas de cura	CTL	0,38	-		

2 semanas a HR50%			
5 semanas em CO ₂	10CDW	0,54	-42
(Alonso, 2016)			
5 semanas de cura	CTL	0,38	-
2 semanas a HR50%			
5 semanas em CO ₂	CDW10	0,57	-50
(Rocha, 2016)			
Origem diferente	CTL	0,33	-
12 semanas de cura			
2 semanas a HR50%	CDWg5	0,39	-19
6 semanas em CO ₂	CDWg10	0,44	-33
(Pereira, 2015)			
12 semanas de cura	CTL	0,6	-
2 semanas a HR50%	CDWf5	0,7	-10
6 semanas em CO ₂	CDWf10	0,8	-29

Como os resultados do $h_{\text{médio}}$ avaliados no presente trabalho pelo uso de AutoCAD parecem ser de 4 a 8 mm superiores aos determinados pelo método preconizado na normalização ((LNEC E 391 1999) e (RILEM CPC-18)), é preferível considerar, apenas os obtidos no método normalizado.

Verifica-se também, que as argamassas de controlo são sempre as que carbonatam menos comparando com as argamassas com substituição por resíduos de construção e demolição, quer sobre a forma de areia (CDWs) quer sobre a forma de adição (CDWa), sendo que nestas últimas os valores da carbonatação são mais altos, provavelmente pelo facto de conterem menos clínquer e consequentemente, menos hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento. O uso de areia reciclada em vez de areia natural siliciosa poderá favorecer a carbonatação, uma vez que as partículas são mais porosas do que as da areia natural permitindo um avanço mais rápido do dióxido de carbono.

Comparando os resultados com outros trabalhos semelhantes, embora o tempo de cura tenha sido variado, observam-se de igual forma, resultados das profundidades de carbonatação das argamassas com substituição parcial do cimento de 2 a 4 mm superiores às profundidades de carbonatação das respetivas argamassas de controlo.

4.3.6.ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os resultados dos coeficientes de absorção por capilaridade ($S_{\text{médio}}$) encontram-se na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Coeficientes de absorção por capilaridade para todas as argamassas

Autor e Ano do estudo	Argamassas	$S_{\text{médio}}$ (mg/(mm ² .min ^{0,5}))	Desempenho (%)
Presente estudo 2 meses de cura	CTL (média CTL1 e CTL2)	0,0614	-
	CDWs	0,0468	24
	5CDWa	0,0820	-34
	CDWs+5CDWa	0,0451	26
(Alonso, 2016; Silva, 2016)	CTL	0,0753	-

2 meses de cura	10CDW	0,0705	6
(Rocha, 2016)	CTL	0,0374	-
3 meses de cura	CDWg5	0,0475	-27
	CDWg10	0,0587	-57

Pela análise da Tabela 4.9, verifica-se que o uso da substituição da areia CEN pela areia reciclada (CDWs) promove uma menor absorção capilar, enquanto a substituição parcial do cimento pelo agregado reciclado moído (5CDWa) prejudica a durabilidade neste aspeto e, quando usados os dois materiais de substituição (CDWs+5CDWa) parece consumir-se um efeito muito positivo da areia reciclada. Esta questão terá que ser comprovada em ensaios futuros. Fazendo a comparação dos resultados presentes (apenas para agregado reciclado fino moído) com os realizados em trabalhos anteriores, os resultados presentes alinham com os resultados de (Rocha, 2016) contrariando os de (Silva, 2016) e (Alonso, 2016). Uma Futura investigação permitirá clarificar o efeito do uso de RCD moído como substituto parcial do cimento na absorção capilar.

4.3.7.CLORETOS

Na Tabela 4.10 encontram-se os resultados obtidos para os coeficientes de difusão de cloretos (D_{ns}).

Tabela 4.10 - Coeficientes de difusão de cloretos para todas as argamassas

Autor e Ano do estudo	Argamassas	D_{ns} médio ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Desempenho (%)
Presente estudo	CTL (média CTL1 e CTL2)	13,61	-
	CDWs	15,12	-11
	5CDWa	14,89	-9
	CDWs+5CDWa	17,34	-27
(Alonso, 2016; Silva, 2016)	CTL	14,19	-
	10CDW	12,77	10
(Rocha, 2016)	CTL	12,00	-
	CDWg5	12,60	-5
	CDWg10	14,50	-21
(Pereira, 2015)	CTL	13,94	-
	CDWf5	12,63	9
	CDWf10	13,66	2

É possível apurar que as diferenças para as argamassas com CDWs e CDWa são pouco significativas relativamente ao CTL (cerca de 15 versus 14). No entanto para a argamassa com ambas as substituições parece verificar-se uma sinergia negativa, com uma diferença já corresponde a cerca de 30% em relação à argamassa de controlo. Comparando o coeficiente de difusão do agregado fino moído (5CDWa) com os coeficientes obtidos nos outros estudos, observa-se que as diferenças são marginais.

4.3.8.REAÇÃO ÁLCALIS-SÍLICA

Os resultados das expansões álcalis-sílica encontram-se na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Expansões ASR para todas as argamassas

Autor e Ano do estudo	Argamassas	Dias	Expansão (%)	Desempenho (%)
Presente estudo	CTL2	16	0,090	-
	CDWs		0,070	22
	5CDWa		0,080	11
	CDWs+5CDWa		0,040	55
(Silva, 2016)	CTL	14	0,016	-
	10CDW		0,072	38
(Alonso, 2016)	CTL	14	0,120	-
	CDW10		0,070	42
(Rocha, 2016)	CTL	14	0,100	-
	CDWg5		0,090	10
	CDWg10		0,080	20
(Pereira, 2015)	CTL	14	0,084	-
	CDWf5		0,075	11
	CDWf10		0,064	24

Para a presente dissertação, obtiveram-se menores expansões para as argamassas com substituição por resíduos de construção e demolição sobretudo para a combinação de areia reciclada e adição. Estes resultados correspondem ao que seria de esperar pois a areia CEN utilizada é bastante reativa como se sabe de estudos anteriores. Retirando material reativo e substituindo-o por areia reciclada, que contém menos sílica reativa pois tem na sua constituição pasta de cimento antiga, conduzirá certamente a uma menor expansão provocada pela reação dos álcalis. Note-se que todos os restantes estudos confirmam esta redução da reatividade.

4.3.9.SULFATOS

Na Tabela 4.12 apresentam-se os resultados das expansões médias finais das argamassas ao longo de 26 e 22 semanas de ensaio (para que seja possível a comparação), bem como os respetivos desempenhos.

Tabela 4.12 - Expansões médias resultantes do ataque de sulfatos no decorrer do tempo de duração do ensaio para todas as argamassas em estudo

Autor e Ano do estudo	Argamassas	Duração (semanas)	Expansão média (%)	Desempenho (%)
Presente estudo	CTL (média CTL1 e CTL2)	26	0,074	-
	CDWs		0,564	-666
	5CDWa		0,112	-51
	CDWs+5CDWa		0,281	-281
	CTL (média CTL1 e CTL2)	22	0,050	-
	CDWs		0,343	-581
	5CDWa		0,065	-29
	CDWs+5CDWa		0,186	-269

(Rocha, 2016)	CTL	22	0,033	-
	CDWg5		0,123	-273
	CDWg10		0,111	-236

Um cimento só é considerado resistente aos sulfatos quando ao fim de 26 semanas de imersão, a expansão for menor ou igual a 0,1 % de acordo com a especificação (LNEC E 462 2004).

Desta forma, para o presente trabalho, foi possível verificar que as argamassas com substituição não são resistentes ao ataque por sulfatos, demonstrando um aumento das expansões com o decorrer do ensaio, mais significativo para as argamassas com 100% de substituição da areia CEN (CDWs). A justificação para o ocorrido é o facto de os resíduos de construção serem constituídos em maior ou menor quantidade por pasta de cimento hidratada antiga e, portanto, contendo aluminatos hidratados suscetíveis de ataque por sulfatos. Sendo a areia natural CEN siliciosa e não suscetível de ataque pelos sulfatos a expansão verificada neste ensaio deverá ser a mais baixa como verificado.

Relativamente aos resultados do outro estudo realizado, para o material como adição, foram igualmente negativos, demonstrando também, que as argamassas com substituição parcial não resistem ao ataque por sulfatos, sendo que, apresentam expansões às 22 semanas também muito elevadas comparadas com as do controlo.

5 CONCLUSÃO

5.1.CONCLUSÕES GERAIS

Após a discussão dos resultados apresentados no capítulo anterior, nos pontos seguintes é realizada uma análise geral com a finalidade de compreender o efeito da substituição parcial do cimento e substituição da areia natural das argamassas por rejeitos de resíduos de construção e demolição. O objetivo final será a incorporação destes resíduos em betão.

Apresentam-se então na Tabela 5.1 os resultados das várias propriedades estudadas:

Tabela 5.1 - Resultados obtidos dos ensaios realizados

Ensaio		Cura	Argamassas			
			CTL	CDWs	5CDWa	CDWs+5CDWa
Trabalhabilidade (mm)						
Resistência mecânica média à compressão (MPa)	28 dias	28 dias	55,0	48,2	44,6	34,8
	Desempenho (%)		-	-12	-19	-37
	56 dias	56 dias	59,1	50,7	48,1	31,8
	Desempenho (%)		-	-14	-19	-46
	84 dias	84 dias	65,6	54,7	53,0	35,9
	Desempenho (%)		-	-17	-19	-45
Resistividade obtida pelo método dos dois elétrodos (Ω.m)	28 dias	28 dias	48,1	39,7	49,4	44,0
	Desempenho (%)		-	-18	3	-9
	56 dias	56 dias	50,3	46,5	56,3	51,9
	Desempenho (%)		-	-8	12	3
	84 dias	84 dias	55,2	48,9	60,7	56,1
	Desempenho (%)		-	-11	10	2
Coeficiente de difusão de cloretos (x10 ⁻¹² m2/s)		56 dias	13,9	15,1	14,9	17,3
Desempenho (%)			-	-9	-7	-25

Expansão devido à reação álcalis-sílica (%) aos 16 dias		Cura acelerada	0,09	0,07	0,08	0,04
Desempenho (%)			-	22	11	55
Coeficiente de absorção por capilaridade (mg/mm ² .min ^{0,5})		56 dias	0,06137	0,04681	0,08196	0,04512
Desempenho (%)			-	24	-34	26
Carbonatação (cm)	Pela Norma	56 dias	0,15	0,23	0,29	0,27
	Desempenho (%)		-	-59	-100	-86
Sulfatos	26 semanas	28 dias na solução CaOH	0,074	0,564	0,112	0,281
	Desempenho (%)		-	-666	-51	-281

Analisando os resultados em termos gerais, poder-se-á concluir o seguinte:

- A substituição parcial do cimento e da areia normalizada CEN pelo RCD originou modificações na trabalhabilidade, pelo que foi necessária a utilização de adjuvante;
- No que diz respeito às resistências à compressão, a utilização de RCD conduziu a uma perda de resistência semelhante para CDWa e CDWs. No entanto, a argamassa CDWs+5CDWa sofreu uma perda significativa de resistência parecendo estes dois materiais criarem uma sinergia negativa.
- A resistividade obtida pelo método dos dois elétrodos embora não permita distinguir as argamassas com clareza, os resultados foram ligeiramente superiores nas argamassas com substituição do cimento em relação às argamassas de controlo e ligeiramente inferiores para as argamassas contendo areia reciclada. Isto é, segundo estes resultados a rede porosa de CDWa parece ser ligeiramente mais apertada do que a conferida por CDWs ao passo que, para o uso dos dois materiais e para argamassas mais maturadas não parece haver diferenças comparando com a rede porosa das argamassas de controlo.
- A profundidade de penetração de cloretos foi ligeiramente superior nas argamassas com substituição, tanto para CDWa como para CDWs. Já para o uso de ambas as substituições verificou-se um aumento maior da difusão de cloretos.
- Relativamente a resistência à reação álcalis-sílica, ASR, obtiveram-se menores expansões para as argamassas com substituição por areia de resíduos de construção e demolição, especialmente para a combinação de areia reciclada e adição. Note-se que como a areia CEN reativa foi substituída por areia reciclada, será menos reativa.
- As argamassas com areia reciclada apresentam resultados bastante positivos no que se refere à absorção de água por capilaridade, enquanto que o agregado fino moído (CDWa) prejudica a durabilidade neste aspeto e, quando são usados os dois materiais de substituição parece consumir-se um efeito muito positivo da areia reciclada.
- Quanto à carbonatação, os resultados foram mais negativos nas argamassas com substituição parcial do cimento do que com a areia reciclada. Note-se que o uso de areia reciclada em vez de areia natural siliciosa parece favorecer a carbonatação porque as partículas são mais porosas do que as da areia natural permitindo um avanço mais rápido do dióxido de carbono.
- Relativamente aos sulfatos, verificou-se que as argamassas com substituição não são resistentes ao ataque por sulfatos, sobretudo as de areia reciclada, uma vez que contêm pasta de cimento antiga e, portanto, aluminatos suscetíveis de ataque.

Na Figura 5.1 apresentam-se os resultados dos desempenhos anteriores sob a forma de uma comparação geral. Note-se que, a argamassa CDWs obteve resultados positivos para a reação álcalis-sílica e absorção de água por capilaridade, a argamassa 5CDWa obteve desempenho positivo para a resistividade em todas as idades e, o seu conjunto (CDWs+5CDWa), para a reação álcalis sílica, absorção de água por capilaridade e resistividade associada ao método dos dois elétrodos aos 84 dias.

O ensaio de sulfatos foi o que apresentou os resultados mais críticos, principalmente para a argamassa com 100% de substituição da areia CEN por CDWs, devido à existência de aluminatos como referido.

Relacionando a argamassa de CDWs com a de 5CDWa é possível verificar que apresentam desempenhos muito semelhantes, porém com ligeiras melhorias para CDWs, não só no que se refere a uma menor perda na resistência, como melhores resultados para todas as propriedades de durabilidade exceto a resistividade e resistência aos sulfatos, como já referido. A combinação dos dois resíduos não é aconselhável sobretudo devido à grande perda de resistências.

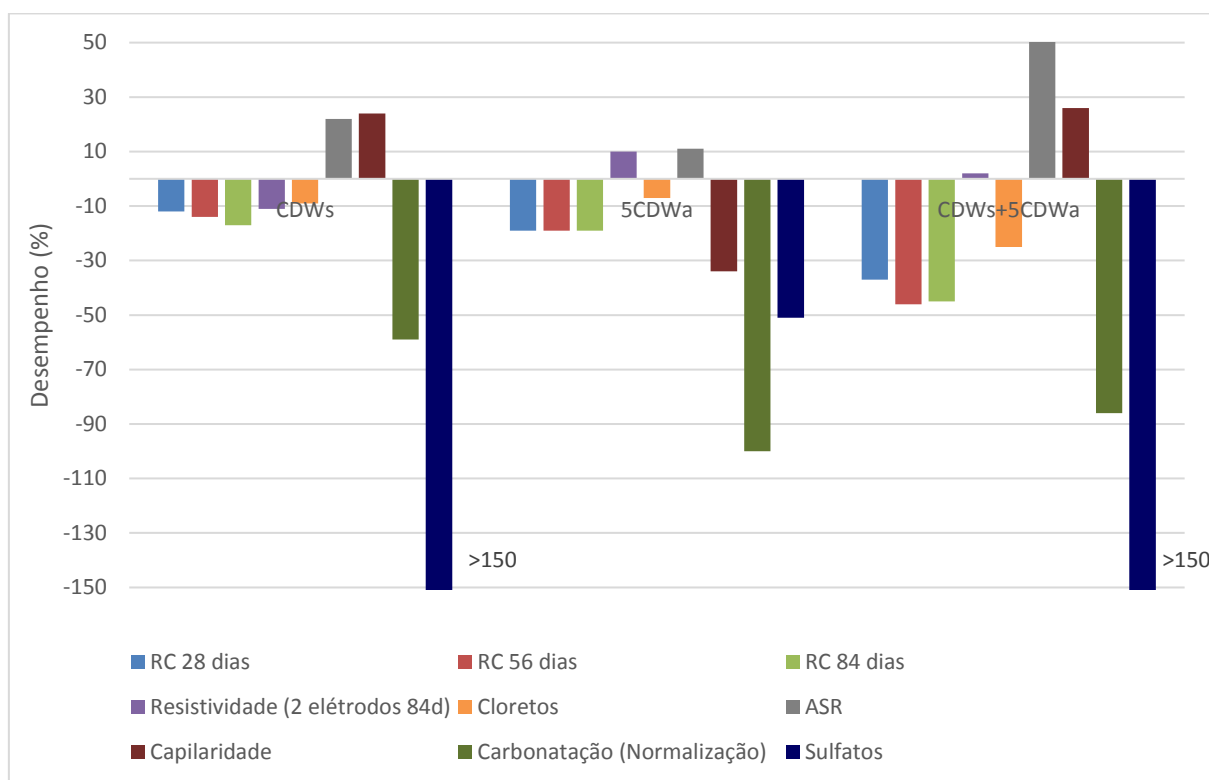


Figura 5.1 - Comparação geral dos resultados das argamassas em estudo

Verifica-se ainda, que a aplicação da substituição de areia por RCD (CDWs) será muito mais económica relativamente ao uso de CDWa, já que, não é necessário proceder a moagem que é sempre um processo dispendioso. Aliás, considerando que é um subproduto da preparação de agregado grosso reciclado apenas será eventualmente necessário algum fracionamento por peneiração. Note-se que neste estudo se considerou uma taxa de substituição de 100%, mas percentagens menores terão um efeito melhorado.

Em termos de normalização para aplicação em argamassas e betões, será também necessário, após a necessária investigação e à semelhança do que foi levado a cabo para o agregado grosso, impor requisitos de qualidade e taxas máximas de substituição para a areia de resíduos de construção e

demolição. Assim, a utilização de areia de resíduos de construção e demolição será sem dúvida uma contribuição para a estratégia do “Resíduo Zero” e para a Economia Circular.

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

De seguida apresentam-se algumas sugestões com o intuito de complementar o presente estudo e que poderão contribuir para o aprofundamento do conhecimento nesta área de forma a promover o uso efetivo destes materiais na construção e assim contribuir para a Economia Circular:

- Realizar novos programas experimentais para testar outras percentagens de substituição;
- Realizar os ensaios com mais provetes de forma a reduzir a variabilidade dos resultados;
- Utilizar resíduos de construção e demolição de composições diferentes e de origens diferentes;
- Extrapolar os programas experimentais para o nível do betão incluindo betão autocompactável;
- Realizar programa experimentais mais completos, englobando a determinação da influência do RCD nouro tipo de propriedades, como a fluência, retração do betão, entre outras;
- Estabelecer e comprovar requisitos mínimos e taxas de substituição máxima para a areia de resíduos de construção e demolição de forma a ser utilizada legalmente em argamassas e betões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, Ana Marisa João (2016) - Resíduos de Vidro e Resíduos de Construção e Demolição no Cimento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- APA (2016) - Portugal ultrapassou meta de valorização de RCD para 2020 [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <http://www.ambienteonline.pt/canal/detalhe/portugal-ultrapassou-meta-de-valorizacao-de-rcd-para-2020>>].
- (2019) - Guia de Boas Práticas para uma adequada gestão de Resíduos de Construção e Demolição. Agência Portuguesa do Ambiente. Disponível em WWW: <https://apambiente.pt/zdata/Políticas/Resíduos/FluxosEspecificosResíduos/RCD/BP_v2.pdf>].
- (2020) - Resíduos de Construção e Demolição (RCD) [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=197&sub3ref=283>>].
- AROSO, Manuel Eduardo Lobão de Sousa (1991) - Durabilidade dos betões - Degradação os betões: Causas e efeitos; reparação e reabilitação dos betões; controlo e garantia da qualidade dos betões Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- (ASTM C1260 2014) - Standard test method for potential alkali-silica reactivity of combinations of cementitious materials and aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method). West Connschocken: ASTM International.
- ASWP (2018) - Projeto Construção Circular (PRCD – Prevenção dos Resíduos de Construção e Demolição) [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <http://www.construcaocircular.pt/>>].
- BEGONHA, Arlindo (2018) - A Patologia do Betão - Corrosão das armaduras. Acessível na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- BEHERA, Monalisa [et al.] (2014) - Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review.
- BETON, RC- (2018) - Science and Technology Center Heilbronn, Germany [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <http://www.rc-beton.de/index-pilotprojekte.html>>].
- BRITO, Jorge de [et al.] (2019) - Real-scale applications of recycled aggregate concrete [Em linha].
- CBECIMAT (2014) - DETERMINAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA E DA POROSIDADE ABERTA DE COMPOSTOS CIMENTÍCIOS DE ENGENHARIA. Disponível em WWW: <<http://www.metallum.com.br/21cbecimat/CD/PDF/204-023.pdf>>].
- COSTA, António; APPLETON, Júlio (1999) - Análise da Penetração de Cloretos em Estruturas de Betão Armado Expostas ao Ambiente Marítimo. Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE) Nº46.
- COSTA, Inês de Almeida Cunha e (2014) - Resíduos de Construção e Demolição: fatores determinantes para a sua gestão integrada e sustentável Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa. Dissertação para obtenção do Grau Mestre em Engenharia do Ambiente.
- COUTINHO, J. S. (2002) - Materiais de Construção 2 - Ligantes Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto : Atualizado em 2015.
- COUTINHO, Joana de Sousa (1999) - Agregados para Argamassas e Betões. Acessível em Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- (2001) - Durabilidade - ATAQUE POR SULFATOS acessível na FEUP.
- COUTINHO, Joana Sousa (2011) - Betões eco-eficientes com resíduos
- COUTINHO, Maria Joana Álvares Ribeiro de Sousa (2005) - Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem. FEUP edições.
- DECRETO-LEI (n.º 46/2008) - Decreto-Lei n.º 46/2008. Portugal: Diário da República n.º 51/2008, Série I de 2008-03-12.
- (n.º 75/2015) - Decreto-Lei n.º 75/2015 de 11 de maio. APA: Diário da República, 1.ª série — N.º 90 — 11 de maio de 2015. Disponível em WWW: <<https://dre.pt/application/file/67188490>>].
- (EN 1015-3:1999 + A1 2004) - Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar by flow table Bruxelas: European Committee for Standardization.
- ESTEVES, Hugo Miguel da Costa (2017) - Identificação de formas de sílica potencialmente reativas em agregados vulcânicos para betão. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- EUROSEPARADORA - Gestão de Resíduos da Construção e Demolição (RCD's) [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <https://euroseparadora.pt/gestao-de-residuos-da-construcao-e-demolicao/>>].

- FEUP (2012) - Projeto RCD-VALOR: Aplicação Sustentável de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em estruturas reforçadas com geossintéticos Disponível em WWW: <URL: https://sigarra.up.pt/feup/en/PUB_GERAL.PUB_VIEW?pi_pub_base_id=103576&pi_pub_r1_id=>>.
- FORDE, Mike (2009) - ICE Manual of Construction Materials Institution of Civil Engineers.
- GRUBL, P.; NEALEN, A.; SCHMIDT, N. (1999) - Concrete made from recycled aggregate - experiences from building project Walspire.
- IRALI, F. [et al.] (2013) - Recycled Concrete Aggregate in Concrete Pavements: A Five Year Study on Its Effect on Pavement Performance. [Em linha]. Disponível em WWW: <URL: <https://trid.trb.org/view/1301834>>.
- ISKHAKOV, Tagir; TIMOTHY, Jithender J.; MESCHKE, Günther (2019) - Expansion and deterioration of concrete due to ASR: Micromechanical modeling and analysis
- JESUS, Lourdimine Santos de (2018) - A Resistividade Elétrica do Concreto e a sua Correlação com a Durabilidade das Estruturas. Disponível em WWW: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.revistaep.com/imagens/volume18_01/cap03.pdf>.
- KIBERT, Charles J. (1994) - ESTABLISHING PRINCIPLES AND A MODEL FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION
- KONSTANTINOVAS, Beatriz; BENTO, Nuno Ventura; SANCHES, Teresa (2019) - Economia Circular no Setor da Construção Civil I - Ciclo dos materiais. CCDD LVT. Disponível em WWW: <<http://www.cddr-lvt.pt/files/3dc71cc1ec03480c312bf8d9f67da0e0f7305e77.pdf>>.
- KUMAR, Rakesh (2017) - Influence of recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste (CDW) on abrasion resistance of pavement concrete. Disponível em WWW: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181730449X>>.
- LEITE, M.B.; SANTANA, V.M (2019) - Evaluation of an experimental mix proportion study and production of concrete using fine recycled aggregate.
- LER (2004) - Lista Europeia de Resíduos Disponível em WWW: <URL: http://norsider.pt/site/documentos/pdf/Lista_Europeia_Residuos.pdf>.
- (LNEC E 391 1999) - Betões. Determinação da resistência à carbonatação. Lisboa: LNEC.
- (LNEC E 393 1993) - Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade. Lisboa: LNEC.
- (LNEC E 461 2007) - Metodologias para prevenir reações expansivas internas. LNEC.
- (LNEC E 462 2004) - Cimentos. Resistência dos cimentos ao ataque por sulfatos. Lisboa: LNEC.
- (LNEC E 463 2004) - Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário. Lisboa: LNEC.
- (LNEC E 471 2009) - Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos. LNEC.
- LÓPEZ-UCEDA, Antonio [et al.] (2016) - Upscaling the Use of Mixed Recycled Aggregates in Non-Structural Low Cement Concrete. [Em linha]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/9/2/91>>.
- MATEUS, Ricardo (2009) - Avaliação da sustentabilidade na construção : propostas para o desenvolvimento de edifícios mais sustentáveis. Universidade do Minho.
- METABOLIC (2017) - CIRCULAR AMSTERDAM: Spatial Implications [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <https://www.metabolic.nl/publications/circular-amsterdam-spatial-implications/>>.
- METHA, P.Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. (2008) - Concreto - Microestrutura, Propriedades e Materiais. 1ª Edição - Tradução para Português da Terceira Edição em Inglês. IBRACON - Instituto Brasileiro de Concreto.
- MOREIRA, Alberto Mário Vaconcelos Tavares (2014) - Patologia do Betão. Acessível na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- NEVILLE, A.M. (1996) - Properties of Concrete. Fourth edition. Wiley.
- (NP EN 196-1 2017) - Métodos de ensaio de cimentos - Determinação das resistências mecânicas. IPQ.
- (NP EN 196-6 2010) - Método de ensaio de cimentos Parte 6 - Determinação da finura. IPQ.
- (NP EN 933-1 2014) - Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica- Método de peneiração. IPQ.
- (NP EN 1097-6 2016) - Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados Parte 6 - Determinação da massa volúmica e da absorção de água. IPQ.
- (NP EN 12620:2002+A12010) - Agregados para betão. IPQ.

- NUNES, Patrícia Alexandra da Paz (2015) - Afinal, o que é a sustentabilidade na construção? Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- ONU (2018b) - GOAL #11: SUSTAINABLE CITIES: WHY THEY MATTER [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2018/09/Goal-11.pdf>>].
- (2019) - Perspectivas Mundiais de População 2019 [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <https://nacoesunidas.org/populacao-mundial-deve-chegar-a-97-bilhoes-de-pessoas-em-2050-diz-relatorio-da-onu/>>].
- PEREIRA, Catarina Isabel Sá (2015) - Resíduos de construção e demolição como substituto parcial do cimento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- PINTO, Bruno Miguel Pinheiro Soares (2013) - Cinza de madeira como adição em betão – resistências mecânicas e durabilidade. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- PNGR (2011) - Plano Nacional de Gestão de Resíduos. Disponível em WWW: <URL: http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwi8rsDhkJmAhVD2-AKHdnCCLsQFjAAegQIBBAC&url=http%3A%2F%2Fwww.apambiente.pt%2F_zdata%2FPolitic%2FResiduos%2FPlaneamento%2FProjeto_PNGR_2011_2020.pdf&usq=AOvVaw2PgvoYx6j6GOKYZic73pcx>].
- PORTARIA (n.º 28/2019) - Portaria n.º 28/2019 de 18 de janeiro. APA: Diário da República, 1.ª série — N.º 13 — 18 de janeiro de 2019 Disponível em WWW: <URL: https://apambiente.pt/_zdata/Politic/Residuos/Transporte/Portaria_28-2019.pdf>].
- (n.º 209/2004) - Diário da República n.º 53/2004, Série I-B de 2004-03-03: Diário da República n.º 53/2004, Série I-B de 2004-03-03. Disponível em WWW: <URL: <https://dre.pt/pesquisa/-/search/551652/details/maximized>>].
- QUERCUS (2018) - Economia circular na construção: Uma necessidade urgente [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <https://www.quercus.pt/comunicados/2018/marco/5550-economia-circular-na-construcao-uma-necessidade-urgente>>].
- RCD - RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO, SA - [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <http://www.rcd.pt/>>].
- (RILEM CPC-18) - CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation dept. RILEM.
- (RILEM TC 116-PCD 1999) - Technical Recommendation: Determination of the capillary absorption of water of hardened concrete.
- ROCHA, Sabina; COUTINHO, Joana Sousa (2018) - Importance of fineness of CDW as cement replacement. IV International Conference Progress of Recycling in the Built Environment [Em linha].
- ROCHA, Telma Sabina Vieira (2016) - RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO – EFEITO NA DURABILIDADE EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- SADATI, Seyedhamed; KHAYAT, Kamal H. (2016) - Field performance of concrete pavement incorporating recycled concrete aggregate. [Em linha]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816315288#>>].
- SIDDIQUE, Rafat; KHAN, Mohammad Iqbal (2011) - Supplementary Cementing Materials. Springer.
- SILVA, Ana Filipa Cadima da (2016) - RESÍDUOS DE MÁRMORE E RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NO CIMENTO Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- SILVA, R.V.; BRITO, J. de; DHIR, R.K. (2019) - Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications.
- SOBRAL, Hernani Sávio (2000) - PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3089801/mod_resource/content/0/ET15.pdf>].
- THOMAS, Blessen Skariah; GUPTA, Ramesh Chandra (2016) - A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. [Em linha]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115011715>>].
- TIRONE, Livia; NUNES, Ken (2007) - Construção Sustentável - Soluções Eficientes Hoje, a Nossa Riqueza de Amanhã.
- UNEP (2016) - GLOBAL MATERIAL FLOWS AND RESOURCE PRODUCTIVITY [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: >].

https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/21557/global_material_flows_full_report_english.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

VERIAN, Kho Pin [et al.] (2013) - Using recycled concrete as aggregate in concrete pavements to reduce materials cost. Disponível em WWW: <https://www.researchgate.net/publication/261363753_Using_Recycled_Concrete_as_Aggregate_in_Concrete_Pavements_to_Reduce_Materials_Cost>.

VIEIRA, Castorina Silva; PEREIRA, Paulo M. (2015) - Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review.

VIEIRA, Castorina Silva; PEREIRA, Paulo Miguel (2013) - Resíduos de Construção e Demolição. Um estado de arte visando a sua valorização em Trabalhos Geotécnicos Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

VISA CONSULTORES - CONSULTORES DE GEOLOGIA APLICADA E ENGENHARIA DO AMBIENTE, S. A - Unidades de triagem e valorização de RCD [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <http://visaconsultores.pt/servicos.php?cat=11&code=50>>.

WANG, Tiao; ISHIDA, Testuya; GU, Rui (2018) - A comparison of the specific surface area of fly ash measured by image analysis with conventional methods.

ANEXOS

Anexo 1 – Ficha Técnica do Cimento CEM I 42,5R (fornecida pela SECIL)

Anexo 2 – Declaração de desempenho do RCD (fornecida pela Resíduos de Construção e Demolição SA)

Anexo 3 – Certificado de Conformidade do Controlo de Produção em Fábrica (fornecida pela Resíduos de Construção e Demolição SA)

Anexo 4 – Trabalhabilidade das argamassas realizadas

Anexo 5 – Resistências Mecânicas aos 28 dias

Anexo 6 – Resistências Mecânicas aos 56 dias

Anexo 7 – Resistências Mecânicas aos 84 dias

Anexo 8 – Absorção de água por capilaridade

Anexo 9 – Profundidade de carbonatação ($h_{\text{médio}}$) AutoCAD

Anexo 10 – Expansões da reação Álcalis-sílica

Anexo 11 – Resistividade associada ao método dos dois elétrodos

Anexo 12 – Coeficiente de difusão de cloretos e Resistividade associada aos 56 dias

Anexo 13 – Expansão devida ao ataque por Sulfatos

Anexo 1
Ficha Técnica do Cimento CEM I 42,5 R (fornecida pela Secil)



RESULTADOS DO AUTOCONTROLO
AUTOCONTROL RESULTS | RÉSULTATS DE L'AUTOCONTRÔLE
VALORES MÉDIOS
AVERAGE RESULTS | RÉSULTATS MOYENNE

REFERÊNCIA Cimento Portland - EN 197-1 CEM I 42,5 R
REFERENCE Portland Cement | Ciment Portland

BOLETIM Nº ACM- 0047 /2017
REPORT N. | RAPPORT N

FÁBRICA Maceira-Liz
PLANT | USINE

DATA 11/12/2017
DATE

MÊS Outubro 2017
MONTH | MOIS October | Octobre

ENSAIOS MECÂNICOS
MECHANICAL TESTS | ESSAIS MECANIKES [NP EN 196-1]

IDADE AGE	Resistência à Flexão (MPa) Flexural Strength Résistance à la Flexion		Resistência à Compressão (MPa) Compressive Strength Résistance à la Compression	
	MÊS MONTH MOIS	ANO YEAR AN	MÊS MONTH MOIS	ANO YEAR AN
2 dias days jours	6,0	5,6	33,4	31,1
7 dias days jours	8,1	7,6	46,8	47,5
28 dias days jours	8,9	8,7	58,4	58,3

ENSAIOS FÍSICOS
PHYSICAL TESTS | ESSAIS PHYSIQUES

	MÊS MONTH MOIS	ANO YEAR AN
Peso Específico (g/cm³) Specific weight Masse volumique	3,10	3,12
Resíduo de Peneiração (%) Sieve Residue Residue de Tamisage [NP EN 196-6]	45 µm	3,0
	32 µm	8,1
Superfície Específica de Blaine (cm²/g) Blaine Spec. Surface Surface spécif. Blaine [NP EN 196-6]	4121	3739
Água na Pasta Normal (%) Water demand Eau de Gâchage [NP EN 196-3]	28,8	28,5
Tempo de Presa (min) Setting Time Temps de Prise [NP EN 196-3]	Início Initial Debut	156
	Fim Final Fin	222
Expansibilidade (mm) Soundness Expansion [NP EN 196-3]	1	1
Índice de Reflectância - Y (0 a 100) Reflectance Réflectance	27	26

INFORMAÇÃO ADICIONAL
ADDITIONAL INFORMATION | INFORMATION SUPPLÉMENTAIRE

--

ANÁLISE QUÍMICA
CHEMICAL ANALYSIS | ANALYSES CHIMIQUES

	MÊS MONTH MOIS	ANO YEAR AN
Perda ao Fogo (%) Loss on Ignition Perte au Feu	-	2,47
Resíduo Insolúvel (%) Insoluble Residue Résidu Insoluble	-	1,36
Óxido de Silício (%) Silicon Oxide Oxyde de Silicium	SiO ₂	20,37
Óxido de Alumínio (%) Aluminium Oxide Oxyde de Aluminium	Al ₂ O ₃	4,82
Óxido de Ferro (%) Ferric Oxide Oxyde de Fer	Fe ₂ O ₃	2,82
Óxido de Cálcio (%) Calcium Oxide Oxyde de Calcium	CaO	62,92
Óxido de Magnésio (%) Magnesium Oxide Oxyde de Magnésium	MgO	1,81
Sulfatos (%) Sulfates Sulfates	SO ₃	3,10
Óxido de Potássio (%) Potassium Oxide Oxyde de Potassium	K ₂ O	0,75
Óxido de Sódio (%) Sodium Oxide Oxyde de Sodium	Na ₂ O	0,17
Cloretos (%) Chloride Chlorures [NP EN 196-2]	Cl	0,05
Cal Livre (%) Free Lime Chaux Libre		1,48
Índice da Saturação em Cal Lime Saturation Factor Depot de Chaux		
Índice Silicioso Silica Ratio Indice Siliceux		
Índice Aluminoso Alumina-Iron Ratio Indice Alumineux		

ANÁLISE MINERALÓGICA (RIETVELD)
MINERALOGICAL ANALYSIS | ANALYSE MINÉRALOGIQUE

Silicato Tricálcico (%) Tricalcium Silicate Silicate Tricalcique	C ₃ S DRx	62,9	61,3
Silicato Bicálcico (%) Dicalcium Silicate Silicate Bicalcique	C ₂ S DRx	12,5	13,0
Aluminato Tricálcico (%) Tricalcium Aluminate Aluminato Tricalcique	C ₃ A DRx	4,1	4,4
Ferro-aluminato Tetracálcico (%) Tetracalcium Aluminoferrite Fer-aluminato Tetracalcique	C ₄ AF DRx	9,8	10,5



APROVADO
APPROVED | APPROUVÉ

PEDRO
EUSEBIO
LOPES GAGO
Digitally signed by
PEDRO EUSEBIO LOPES
GAGO
Date: 2017.12.11
08:58:20 Z

ANO | YEAR | AN : Últimos 12 meses. Last 12 months. Dernier 12 mois.
NOTA | NOTE : Os parâmetros são determinados por métodos internos com excepção dos que indicam a [norma aplicada]. The parameters are determined by internal methods, except when a [standard] is indicated. Les paramètres sont déterminés par méthodes internes, except leurs que indique la [norme appliquée].

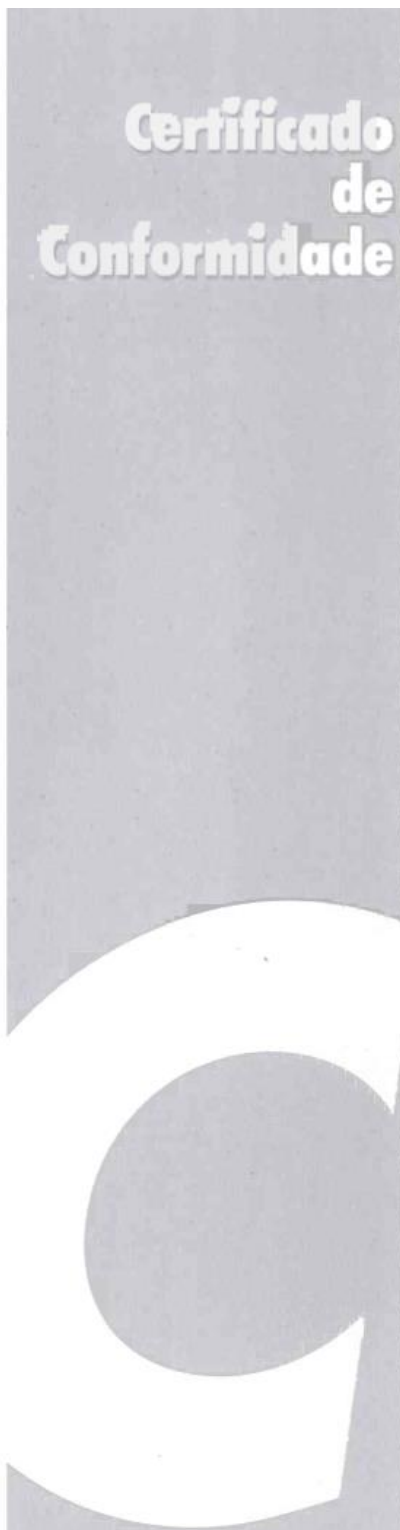
Anexo 2

Declaração de Desempenho do RCD (fornecida pela Resíduos de Construção e Demolição SA)

DD 1	Declaração de Desempenho		Rev. N.º 3	 rcd resíduos de construção e demolição sa																																																																																														
1	Código de identificação único do produto - tipo (Agregado Reciclado 0/10)																																																																																																	
2	Utilização ou utilizações previstas do produto de construção, de acordo com a especificação técnica harmonizada aplicável, tal como previsto pelo fabricante: Materiais tratados com ligantes hidráulicos e materiais não tratados para utilização em trabalhos de engenharia Civil, construção de estradas e outras áreas de circulação. (NP EN 13242:2002+A1:2010)																																																																																																	
3	Fabricante Resíduos de Construção e de Demolição, S.A. Zona Industrial de Ferreira-a-Nova, nº 1 Centro de Produção - Zona Industrial de Ferreira-a-Nova, nº 1																																																																																																	
4	Sistema ou sistemas de avaliação e verificação da regularidade do desempenho (AVPC) Sistema 2+																																																																																																	
5	Norma Harmonizada NP EN 13242:2002+A1:2010.																																																																																																	
6	Organismo Notificado EIC - Empresa Internacional de Certificação, S.A., com o número 1515.																																																																																																	
7	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Desempenho declarado</th> <th colspan="4">Granulometria Típica (GT)</th> </tr> <tr> <th>Características Essenciais (1)</th> <th>Desempenho Declarado (2)</th> <th>Peneiros</th> <th>LI</th> <th>GT</th> <th>LS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Dimensão nominal (d/D)</td> <td>0/10</td> <td>14 mm</td> <td>100</td> <td>100</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>Granulometria (Categoria)</td> <td>GA85, GT A10</td> <td>12,5 mm</td> <td></td> <td>100</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Teor de Finos (Categoria / Valor Declarado)</td> <td>f₂₅ / NR</td> <td>10 mm</td> <td>94</td> <td>99</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Massa Volúmica (Valor Declarado)</td> <td>ρ_s</td> <td>2,64 ± 0,05 mg/m³</td> <td>4 mm</td> <td>82</td> <td>92</td> </tr> <tr> <td>ρ_{rd}</td> <td>2,40 ± 0,05 mg/m³</td> <td>2 mm</td> <td></td> <td>84</td> </tr> <tr> <td>ρ_{cdd}</td> <td>2,50 ± 0,05 mg/m³</td> <td>0,25 mm</td> <td></td> <td>37</td> </tr> <tr> <td>Absorção de água (Valor Declarado)</td> <td>3,7 ± 0,5 %</td> <td>0,063 mm</td> <td>16,8</td> <td>21,8</td> <td>24,8</td> </tr> <tr> <td>Azul Metileno (Valor Declarado)</td> <td>NPD</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Equivalente de Areia (Valor Declarado)</td> <td>> 21</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Conteúdo de Constituintes (Categorias)</td> <td>Rc30 ; Rcug50; Rb 30 - ; Ra 1-; Rg 2-; X -1; FL 10-</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Resistência à fragmentação (Categoria)</td> <td>NA</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Sulfatos solúveis em água (Categoria)</td> <td>SS_{0,7}</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Teor de enxofre total (Valor Limite / Categoria)</td> <td>S1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Teor de húmus (Valor Declarado)</td> <td>Teste Positivo</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <div> <p>Especificações Técn. Harmonizadas NP EN 13242:2002+A1:2010</p> <p>Notas:</p> <p>NPD - Desempenho Não Determinado</p> <p>NA - Característica Não Aplicável ao Agregado</p> </div>				Desempenho declarado		Granulometria Típica (GT)				Características Essenciais (1)	Desempenho Declarado (2)	Peneiros	LI	GT	LS	Dimensão nominal (d/D)	0/10	14 mm	100	100	100	Granulometria (Categoria)	GA85, GT A10	12,5 mm		100		Teor de Finos (Categoria / Valor Declarado)	f ₂₅ / NR	10 mm	94	99	100	Massa Volúmica (Valor Declarado)	ρ _s	2,64 ± 0,05 mg/m³	4 mm	82	92	ρ _{rd}	2,40 ± 0,05 mg/m³	2 mm		84	ρ _{cdd}	2,50 ± 0,05 mg/m³	0,25 mm		37	Absorção de água (Valor Declarado)	3,7 ± 0,5 %	0,063 mm	16,8	21,8	24,8	Azul Metileno (Valor Declarado)	NPD					Equivalente de Areia (Valor Declarado)	> 21					Conteúdo de Constituintes (Categorias)	Rc30 ; Rcug50; Rb 30 - ; Ra 1-; Rg 2-; X -1; FL 10-					Resistência à fragmentação (Categoria)	NA					Sulfatos solúveis em água (Categoria)	SS _{0,7}					Teor de enxofre total (Valor Limite / Categoria)	S1					Teor de húmus (Valor Declarado)	Teste Positivo				
Desempenho declarado		Granulometria Típica (GT)																																																																																																
Características Essenciais (1)	Desempenho Declarado (2)	Peneiros	LI	GT	LS																																																																																													
Dimensão nominal (d/D)	0/10	14 mm	100	100	100																																																																																													
Granulometria (Categoria)	GA85, GT A10	12,5 mm		100																																																																																														
Teor de Finos (Categoria / Valor Declarado)	f ₂₅ / NR	10 mm	94	99	100																																																																																													
Massa Volúmica (Valor Declarado)	ρ _s	2,64 ± 0,05 mg/m³	4 mm	82	92																																																																																													
	ρ _{rd}	2,40 ± 0,05 mg/m³	2 mm		84																																																																																													
	ρ _{cdd}	2,50 ± 0,05 mg/m³	0,25 mm		37																																																																																													
Absorção de água (Valor Declarado)	3,7 ± 0,5 %	0,063 mm	16,8	21,8	24,8																																																																																													
Azul Metileno (Valor Declarado)	NPD																																																																																																	
Equivalente de Areia (Valor Declarado)	> 21																																																																																																	
Conteúdo de Constituintes (Categorias)	Rc30 ; Rcug50; Rb 30 - ; Ra 1-; Rg 2-; X -1; FL 10-																																																																																																	
Resistência à fragmentação (Categoria)	NA																																																																																																	
Sulfatos solúveis em água (Categoria)	SS _{0,7}																																																																																																	
Teor de enxofre total (Valor Limite / Categoria)	S1																																																																																																	
Teor de húmus (Valor Declarado)	Teste Positivo																																																																																																	
Quando, nos termos do artigo 37.º ou do artigo 38.º, tenha sido utilizada documentação técnica específica, os requisitos a que o produto obedece																																																																																																		
NA (Não aplicável)																																																																																																		
8	Assinado por e em nome do fabricante Catarina Santos (Responsável pelo Controlo de Produção em Fábrica) Ferreira-a-Nova, 17 de Abril de 2019																																																																																																	

Anexo 3

Certificado de Conformidade do Controlo de Produção em Fábrica (fornecido pela Resíduos de Construção e Demolição SA)



Nº de Organismo Notificado: 1515

Certificado de Conformidade do Controlo de Produção em Fábrica nº 1515-CPR-0393

Em conformidade com o Regulamento (UE) n.º 305/2011 do Parlamento Europeu e do Conselho de 9 de Março de 2011 (Regulamento dos Produtos de Construção), este certificado aplica-se ao(s) seguinte(s) Produto(s) de Construção:

(Ver Anexo Técnico)

produzido(s) por

RCD - Resíduos de Construção e Demolição, S.A.

Rua Fernando Jorge Sousa Simões, nº 1
Zona Industrial de Ferreira-a-Nova
3090-840 FIGUEIRA DA FOZ

nos seguintes locais

(Ver Anexo Técnico)

cumprir as disposições relativas à avaliação e verificação da regularidade do desempenho descrito no anexo ZA e os requisitos da(s) norma(s)

EN 13242:2002+A1:2007

as quais são aplicadas sob o sistema 2+

Este Certificado foi emitido inicialmente a **2018-04-12**, sendo o mesmo válido até **2021-03-08** e enquanto as condições técnicas estabelecidas pela(s) Norma(s) referida(s) se mantiverem e as condições de fabricação e controlo da produção pelo fabricante não se alterem significativamente.

Lisboa, 12 de Abril de 2018

Manuel Vidigal
Presidente C.A.

Para confirmar a validade deste certificado, queira p.f. contactar a EIC através de geral@eic.pt ou 214 220 640

eic empresa internacional de certificação

Certificado de Conformidade



Nº de Organismo Notificado: 1515

Anexo Técnico ao Certificado de Conformidade do Controlo de Produção em Fábrica nº 1515-CPR-0393

Este Anexo Técnico só é válido em conjunto com o certificado n.º 1515-CPR-0393 emitido pela EIC e enquanto este se mantiver em vigor.

Centro de Produção	Designação Comercial do Produto	Normas Harmonizadas Aplicáveis
Zona Industrial de Ferreira-a-Nova 3090-840 FIGUEIRA DA FOZ	Agregado Reciclado (0/10) Britado Mesclado Reciclado (0/40) Areias Recicladas (0/12,5) Britado Betuminoso Reciclado (0/40)	EN 13242: 2002+A1:2007

Lisboa, 12 de Abril de 2018

Manuel Vidigal
Presidente C.A.

Para confirmar a validade deste certificado, queira p.f. contactar a EIC através de geral@eic.pt ou 214 220 640

eic empresa internacional de certificação

Rua da Tibola Portuguesa, n.º 8 - 2.º - Esquadro 10 - 1750-292 Lisboa - Tel.: +(351) 21 422 96 40 - Fax: +(351) 21 422 96 49 - Email: geral@eic.pt

Anexo 4
Trabalhabilidade das argamassas realizadas

Ensaio	Data de Moldagem	Trabalhabilidade (mm)				
		CTL1	CTL2	CDWs	5CDWa	CDWs+5CDWa
Resistências aos 28 d	28/05/2019	196	196	192	196	203
Resistências aos 56 d	27/05/2019	199	197	207	196	197
Resistências aos 84 d e Resistividade	05/06/2019	198	196	191	197	190
Carbonatação	04/06/2019	195	198	196	200	198
Absorção de água por Capilaridade	21/05/2019 (CTL1 e CDWs)	199	-	194	-	-
	22/05/2019 (CTL2 e 5CDWa)	-	201	-	199	-
	27/05/2019 (CDWs+5CDWa)	-	-	-	-	196
Penetração de cloretos	28/05/2019 (CTL1 e CDWs)	196	-	191	-	-
	04/06/2019 (CTL2 e 5CDWa)	-	198	-	194	-
	27/05/2019 (CDWs+5CDWa)	-	-	-	-	199
Reação Álcalis-Sílica	04/06/2019 (CTL1)	199	-	-	-	-
	03/06/2019 (CTL2 e 5CDWa)	-	197	-	195	-
	11/06/2019 (CDWs e CDWs+5CDWa)	-	-	190	-	191
Resistência ao ataque por Sulfatos	28/05/2019 (CTL1)	196	-	-	-	-
	04/06/2019 (CTL2 e 5CDWa)	-	198	-	194	-
	27/05/2019 (CDWs+5CDWa)	-	-	-	-	199
	11/06/2019 (CDWs)	-	-	191	-	-
Média Total		197	198	194	196	197
Desvio Padrão		1,67	1,60	5,61	2,20	4,31

Ensaio	Espalhamentos (mm)									
	CTL1				Média	CTL2				Média
Resistências Mecânicas 28 dias	194	196	196	196	196	195	196	196	198	196
Resistências Mecânicas 56 dias	199	197	199	199	199	196	196	195	199	197
Resistências Mecânicas 84 dias e Resistividade	198	198	199	198	198	197	196	194	198	196
Resistência à Carbonatação	194	195	195	195	195	197	198	197	198	198
Penetração de Cloretos	199	195	195	199	196	199	195	196	199	198
	195	194	195	195		200	198	197	200	
Absorção por Capilaridade	199	200	200	199	199	201	200	199	199	201
	197	201	199	196		201	201	202	203	
ASR	199	199	199	200	199	197	196	198	198	197
Resistência ao ataque por sulfatos	199	195	195	199	196	199	195	196	199	198
	195	194	195	195		200	198	197	200	
Trabalhabilidade (mm)	197					198				
Desvio Padrão	1,67					1,60				

Ensaio	Espalhamentos (mm)									
	CDWs				Média	5CDWa				Média
Resistências Mecânicas 28 dias	192	192	192	192	192	195	198	197	194	196
Resistências Mecânicas 56 dias	208	206	206	207	207	197	196	194	197	196
Resistências Mecânicas 84 dias e Resistividade	193	191	189	192	191	196	197	197	198	197
Resistência à Carbonatação	196	196	196	196	196	200	200	199	199	200
Penetração de Cloretos	192	194	193	192	191	195	194	194	195	194
	190	187	190	190		193	194	191	194	
Absorção por Capilaridade	194	198	196	195	194	198	200	200	198	199
	195	191	192	193		198	201	198	201	
ASR	190	189	189	192	190	195	194	193	198	195
Resistência ao ataque por sulfatos	192	194	193	192	191	195	194	194	195	194
	190	187	190	190		193	194	191	194	
Trabalhabilidade (mm)	194					196				
Desvio Padrão	5,61					2,20				

Ensaio	Espalhamentos (mm)				
	CDWs+5CDWa				Média
Resistências Mecânicas 28 dias	201	204	203	202	203
Resistências Mecânicas 56 dias	196	198	197	197	197
Resistências Mecânicas 84 dias e Resistividade	189	189	189	191	190
Resistência à Carbonatação	188	188	187	188	188
Penetração de Cloretos	197	197	199	196	199
	200	200	200	200	
Absorção por Capilaridade	194	193	193	193	196
	198	198	199	198	
ASR	189	192	191	192	191
Resistência ao ataque por sulfatos	197	197	199	196	199
	200	200	200	200	
Trabalhabilidade (mm)	197				
Desvio Padrão	4,31				

Resistências mecânicas aos 28 dias

Referência	Massa (g)	Resistência à flexão		Resistência à flexão média		Desvio Padrão		Coeficiente de variação		Desempenho
		(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	
CTL1	607,9	3,2	7,5	3,3	7,7	0,1	0,3	3,5	3,8	-
	608,3	3,2	7,5							
	608,4	3,4	8,0							
CTL2	610,9	3,0	7,0	3,2	7,3	0,1	0,3	3,2	3,5	-
	608,6	3,2	7,5							
	608,9	3,1	7,3							
CDWs	577,5	2,9	6,8	2,9	6,7	0,1	0,1	2,0	1,7	-11
	577,6	2,9	6,8							
	580,0	2,8	6,6							
5CDWa	586,2	2,7	6,3	2,9	6,6	0,1	0,3	3,5	3,8	-12
	586,1	2,9	6,8							
	589,1	2,8	6,6							
CDWs+5CDWa	539,1	2,1	4,9	2,4	5,4	0,2	0,4	7,2	7,5	-28
	546,6	2,4	5,6							
	551,6	2,4	5,6							

Referência	Massa (g)	Resistência à compressão				Resistência à compressão média		Desvio Padrão		Coeficiente de variação		Desempenho (%)
		(kN)	(kN)	(MPa)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	
CTL1	607,9	88,1	90,3	55,1	56,4	89,3	55,8	1,0	0,6	1,1	1,0	-
	608,3	88,1	90,1	55,1	56,3							
	608,4	89,7	89,5	56,1	55,9							
CTL2	610,9	87,0	88,6	54,4	55,4	86,6	54,2	1,2	0,7	1,3	1,4	-
	608,6	85,6	85,5	53,5	53,4							
	608,9	86,1	87,0	53,8	54,4							
CDWs	577,5	79,9	77,7	49,9	48,6	77,2	48,2	1,6	1,0	2,0	2,0	-12
	577,6	77,3	76,3	48,3	47,7							
	580,0	76,2	75,5	47,6	47,2							
5CDWa	586,2	69,6	70,1	43,5	43,8	71,3	44,6	1,4	0,9	1,9	1,9	-19
	586,1	72,2	71,8	45,1	44,9							
	589,1	70,9	73,2	44,3	45,8							
CDWs+5CDWa	539,1	34,8	42,4	-	-	49,9	34,8	9,7	2,8	19,5	7,9	-37
	546,6	57,4	57,1	35,9	35,7							
	551,6	58,8	49,1	36,8	30,7							

Resistências mecânicas aos 56 dias

Referência	Massa (g)	Resistência à flexão		Resistência à flexão média		Desvio Padrão		Coeficiente de variação		Desempenho
		(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	
CTL1	608,4	3,2	7,5	3,4	7,7	0,2	0,4	5,2	5,2	-
	608,8	3,5	8,2							
	608,5	3,2	7,5							
CTL2	612,7	3,5	8,2	3,1	7,6	0,3	0,6	8,1	8,0	-
	612,9	3,2	7,5							
	611,9	3,0	7,0							
CDWs	579,7	3,0	7,0	2,9	6,9	0,1	0,2	4,0	3,4	-10
	578,4	2,8	6,6							
	582,2	3,0	7,0							
5CDWa	590,7	2,9	6,8	2,9	6,8	0,0	0,0	0,0	0,0	-11
	591,5	2,9	6,8							
	593,8	2,9	6,8							
CDWs+5CDWa	524,9	1,1	2,6	2,3	4,5	0,7	1,6	30,1	36,2	-41
	532,2	2,3	5,4							
	522,0	2,3	5,4							

Referência	Massa (g)	Resistência à compressão				Resistência à compressão média		Desvio Padrão		Coeficiente de variação		Desempenho (%)
		(kN)	(kN)	(MPa)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	
CTL1	608,4	92,6	93,3	57,9	58,3	94,5	59,0	1,9	1,2	2,0	2,0	-
	608,8	92,3	96,3	57,7	60,2							
	608,5	96,3	95,9	60,2	59,9							
CTL2	612,7	93,9	96,1	58,7	60,1	94,5	59,1	1,3	0,8	1,4	1,4	-
	612,9	94,4	95,6	59	59,8							
	611,9	94,7	92,5	59,2	57,8							
CDWs	579,7	83,4	80,6	52,1	50,4	81,1	50,7	5,1	3,2	6,3	6,3	-14
	578,4	82,7	71,0	51,7	44,4							
	582,2	84,2	84,6	52,6	52,9							
5CDWa	590,7	77,6	77,8	48,5	48,6	77,0	48,1	1,6	1,0	2,1	2,1	-19
	591,5	74,7	76,6	46,7	47,9							
	593,8	79,3	75,7	49,6	47,3							
CDWs+5CDWa	524,9	52,9	53,1	33,1	33,2	44,9	31,8	8,0	2,3	17,7	7,2	-46
	532,2	43,9	46,7	-	29,2							
	522,0	40,5	32,2	-	-							

Resistências mecânicas aos 84 dias

Referência	Massa (g)	Resistência à flexão		Resistência à flexão média		Desvio Padrão		Coeficiente de variação		Desempenho
		(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	
CTL1	603,1	3,5	8,2	3,5	8,1	0,1	0,1	1,7	1,4	-
	603,0	3,5	8,2							
	603,9	3,4	8,0							
CTL2	597,6	3,5	8,2	3,4	8,0	0,2	0,4	5,2	5,1	-
	602,7	3,5	8,2							
	601,1	3,2	7,5							
CDWs	569,2	3,0	7,0	3,3	7,4	0,2	0,4	4,7	4,9	-8
	568,5	3,3	7,7							
	566,7	3,2	7,5							
5CDWa	582,1	3,1	7,3	3,1	7,3	0,0	0,0	0,0	0,0	-9
	581,3	3,1	7,3							
	582,0	3,1	7,3							
CDWs+5CDWa	530,4	2,5	5,9	2,4	5,6	0,1	0,3	4,3	4,5	-30
	528,9	2,4	5,6							
	520,1	2,3	5,4							

Referência	Massa (g)	Resistência à compressão				Resistência à compressão média		Desvio Padrão		Coeficiente de variação		Desempenho (%)
		(kN)	(kN)	(MPa)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	
CTL1	603,1	103,6	103,2	64,8	64,5	104,7	65,4	1,9	1,2	1,8	1,8	-
	603,0	105,0	102,5	65,6	64,1							
	603,9	107,4	106,4	67,1	66,5							
CTL2	597,6	106,7	105,3	66,7	65,8	105,2	65,7	1,6	1,0	1,5	1,5	-
	602,7	105,5	105,1	65,9	65,7							
	601,1	106,3	102,1	66,4	63,8							
CDWs	569,2	87,9	91,4	54,9	57,1	87,5	54,7	2,6	1,6	3,0	3,0	-17
	568,5	83,4	86,7	52,1	54,2							
	566,7	86,9	88,5	54,3	55,3							
5CDWa	582,1	82,4	85,6	51,5	53,5	84,8	53,0	1,6	1,0	1,8	1,8	-19
	581,3	85,0	86,1	53,1	53,8							
	582,0	86,3	83,5	53,9	52,2							
CDWs+5CDWa	530,4	58,8	57,5	36,8	35,9	57,3	35,9	3,3	2,1	5,8	5,8	-45
	528,9	61,9	58,8	38,7	36,8							
	520,1	54,1	52,9	33,8	33,1							

Anexo 8

Absorção de água por capilaridade

Argamassas	Área exata (mm ²)	S (mg/(mm ² .min ^{0,5}))	Smédio (mg/(mm ² .min ^{0,5}))	a ₀ (mg/mm ²)	a ₀ médio (mg/mm ²)	R ²	Desvio Padrão	CV (%)	Desempenho (%)
CTL1	7853,98	0,06373	0,06499	0,0888	0,10336	0,9851	0,0065	10,1	-
	7853,98	0,07207		0,1292		0,9787			
	7853,98	0,05917		0,0920		0,9863			
CTL2	7853,98	0,06368	0,05774	0,1591	0,16060	0,9753	0,0082	14,2	-
	7853,98	0,04838		0,1484		0,9789			
	7853,98	0,06117		0,1743		0,9806			
CDWs	7853,98	0,04802	0,04681	0,1144	0,11924	0,9700	0,0120	25,6	24
	7853,98	0,05817		0,1461		0,9745			
	7853,98	0,03425		0,0973		0,9833			
5CDWa	7853,98	0,09091	0,08196	0,1698	0,15844	0,9832	0,0950	11,6	-34
	7853,98	0,08302		0,1915		0,9835			
	7853,98	0,07195		0,114		0,9881			
CDWs+ 5CDWa	7853,98	0,0458	0,10332	0,132	0,10332	0,9887	0,0043	9,5	26
	7853,98	0,04054		0,1048		0,9878			
	7853,98	0,04903		0,0732		0,996			

Anexo 9

Profundidade de carbonatação ($h_{\text{médio}}$) AutoCAD

Ref. ^a série	Número do provete	Área do provete (cm ²)	Área do provete AutoCAD (cm ²)	Área não carbonatada AutoCAD (cm ²)	Área não carbonatada calculada (cm ²)	Área carbonatada calculada (cm ²)	Área carbonatada média (cm ²)	h (cm)	$h_{\text{médio}}$ (cm)
CTL1	1	16	27	22	13,20	2,80	3,26	0,18	0,22
	2	16	26	20	12,41	3,59		0,24	
	3	16	25	20	12,62	3,38		0,22	
CTL2	1	16	25	21	13,24	2,76	2,86	0,18	0,19
	2	16	24	19	12,74	3,26		0,22	
	3	16	25	21	13,44	2,56		0,17	
CDWs	1	16	24	18	11,67	4,33	4,05	0,29	0,27
	2	16	23	17	11,51	4,49		0,30	
	3	16	23	18	12,68	3,32		0,22	
5CDWa	1	16	23	15	10,76	5,24	5,14	0,36	0,35
	2	16	21	14	10,50	5,50		0,38	
	3	16	22	16	11,31	4,69		0,32	
CDWs+5CDWa	1	16	22	15	10,77	5,23	5,15	0,36	0,35
	2	16	21	13	9,95	6,05		0,42	
	3	16	21	16	11,83	4,17		0,28	

Anexo 10
Expansões da reação Álcalis-sílica

<u>Referência da amostra:</u>		CTL 1			
Dia	Provete	Leitura média	Diferença com a leitura 0	Expansão	Expansão média
		(mm)		(%)	(%)
2 (leitura 0)	A	-4,7405	0	0	0
	B	-5,1098	0	0	
	C	-4,8503	0	0	
3	A	-4,7368	0,0037	0,001	0
	B	-5,1008	0,009	0,004	
	C	-4,8428	0,0075	0,003	
8	A	-4,6888	0,0517	0,021	0,02
	B	-5,0528	0,057	0,023	
	C	-4,8013	0,049	0,02	
14	A	-4,6545	0,086	0,034	0,04
	B	-5,0123	0,0975	0,039	
	C	-4,7605	0,0898	0,036	
15	A	-4,5685	0,172	0,069	0,07
	B	-4,9248	0,185	0,074	
	C	-4,6853	0,165	0,066	
21	A	-4,441	0,2995	0,12	0,12
	B	-4,794	0,3158	0,126	
	C	-4,562	0,2883	0,115	
28	A	-4,3423	0,3982	0,159	0,16
	B	-4,6993	0,4105	0,164	
	C	-4,4768	0,3735	0,149	

Referência da amostra:		CTL 2			
Dia	Provete	Leitura média	Diferença com a leitura 0	Expansão	Expansão média
		(mm)		(%)	(%)
2 (leitura 0)	A	-4,8168	0	0	0
	B	-5,1153	0	0	
	C	-4,6753	0	0	
3	A	-4,8493	-0,0325	-0,013	-0,01
	B	-5,1498	-0,0345	-0,014	
	C	-4,7108	-0,0355	-0,014	
8	A	-4,7505	0,0663	0,027	0,03
	B	-5,0493	0,066	0,026	
	C	-4,6058	0,0695	0,028	
10	A	-4,7128	0,104	0,042	0,04
	B	-5,0115	0,1038	0,042	
	C	-4,596	0,0793	0,032	
16	A	-4,5995	0,2173	0,087	0,09
	B	-4,9028	0,2125	0,085	
	C	-4,4608	0,2145	0,086	
22	A	-4,4968	0,32	0,128	0,13
	B	-4,798	0,3173	0,127	
	C	-4,355	0,3203	0,128	
28	A	-4,4073	0,4095	0,164	0,16
	B	-4,7048	0,4105	0,164	
	C	-4,2658	0,4095	0,164	

Referência da amostra:		CDWs			
Dia	Provete	Leitura média	Diferença com a leitura 0	Expansão	Expansão média
		(mm)		(%)	(%)
2 (leitura 0)	A	-5,2815	0	0	0
	B	-4,7828	0	0	
	C	-5,0758	0	0	
5	A	-5,2728	0,0087	0,003	0
	B	-4,7728	0,01	0,004	
	C	-5,0588	0,017	0,007	
8	A	-5,2208	0,0607	0,024	0,03
	B	-4,7195	0,0633	0,025	
	C	-5,0115	0,0643	0,026	
14	A	-5,1915	0,09	0,036	0,04
	B	-4,6893	0,0935	0,037	
	C	-4,9765	0,0993	0,04	
16	A	-5,1065	0,175	0,07	0,07
	B	-4,6035	0,1793	0,072	
	C	-4,8868	0,189	0,076	
21	A	-5,0488	0,2327	0,093	0,1
	B	-4,5485	0,2343	0,094	
	C	-4,831	0,2448	0,098	
28	A	-4,977	0,3045	0,122	0,12
	B	-4,4735	0,3093	0,124	
	C	-4,7583	0,3175	0,127	

Referência da amostra:		5CDWa			
Dia	Provete	Leitura média	Diferença com a leitura 0	Expansão	Expansão média
		(mm)		(%)	(%)
2 (leitura 0)	A	-4,8023	0	0	0
	B	-4,8663	0	0	
	C	-5,0028	0	0	
5	A	-4,7405	0,0618	0,025	0,03
	B	-4,8025	0,0638	0,026	
	C	-4,943	0,0598	0,024	
8	A	-4,6905	0,1118	0,045	0,04
	B	-4,7553	0,111	0,044	
	C	-4,895	0,1078	0,043	
14	A	-4,6745	0,1278	0,051	0,05
	B	-4,7268	0,1395	0,056	
	C	-4,8683	0,1345	0,054	
16	A	-4,6013	0,201	0,08	0,08
	B	-4,6528	0,2135	0,085	
	C	-4,8035	0,1993	0,08	
21	A	-4,5333	0,269	0,108	0,11
	B	-4,5868	0,2795	0,112	
	C	-4,7346	0,2682	0,107	
28	A	-4,4695	0,3328	0,133	0,14
	B	-4,522	0,3443	0,138	
	C	-4,6685	0,3343	0,134	

Referência da amostra:		CDWs+5CDWa			
Dia	Provete	Leitura média	Diferença com a leitura 0	Expansão	Expansão média
		(mm)		(%)	(%)
2 (leitura 0)	A	-4,224	0	0	0
	B	-4,1425	0	0	
	C	-5,0683	0	0	
5	A	-4,2213	0,0027	0,001	0
	B	-4,1375	0,005	0,002	
	C	-5,062	0,0063	0,003	
8	A	-4,182	0,042	0,017	0,02
	B	-4,0973	0,0452	0,018	
	C	-5,0248	0,0435	0,017	
14	A	-4,167	0,057	0,023	0,02
	B	-4,0813	0,0612	0,024	
	C	-5,0105	0,0578	0,023	
16	A	-4,114	0,11	0,044	0,04
	B	-4,0313	0,1112	0,044	
	C	-4,9643	0,104	0,042	
21	A	-4,0765	0,1475	0,059	0,06
	B	-3,9988	0,1437	0,057	
	C	-4,9338	0,1345	0,054	
28	A	-4,0395	0,1845	0,074	0,07
	B	-3,9615	0,181	0,072	
	C	-4,896	0,1723	0,069	

Anexo 11

Resistividade associada ao método dos dois elétrodos

Ref. ^a série	Número da amostra	Tensão (Volts)	Intensidade de corrente (A)	Resistência elétrica	l (m)	ρ (Ω .m)	$\rho_{\text{médio}}$ (Ω .m)	$\rho_{\text{médio}} - \text{série}$ (Ω .m)	Desvio(Ω .m)	CV (%)
CTL 1 (28 dias)	1	6,99	0,0014138	4944,69	0,2	49,45	49,36	48,63	0,83	1,70
		6,99	0,0014187	4927,47		49,27				
	2	6,99	0,0014634	4775,45	0,2	47,75	47,73			
		6,99	0,0014647	4771,01		47,71				
	3	6,99	0,0014321	4880,59	0,2	48,81	48,79			
		6,99	0,0014333	4876,65		48,77				
CTL 2 (28 dias)	1	6,99	0,0014719	4747,27	0,2	47,47	47,46	47,64	0,34	0,72
		6,99	0,0014727	4745,43		47,45				
	2	6,99	0,0014544	4805,14	0,2	48,05	48,03			
		6,99	0,0014554	4801,77		48,02				
	3	6,99	0,0014737	4741,33	0,2	47,41	47,43			
		6,99	0,0014729	4743,97		47,44				
CDWs (28 dias)	1	6,98	0,0017062	4088,62	0,2	40,89	40,87	39,69	1,03	2,59
		6,98	0,0017076	4085,15		40,85				
	2	6,97	0,0017891	3896,60	0,2	38,97	38,96			
		6,97	0,0017898	3895,07		38,95				
	3	6,97	0,0017756	3926,56	0,2	39,27	39,26			
		6,97	0,0017765	3924,63		39,25				
5CDWa (28 dias)	1	6,99	0,0014244	4908,24	0,2	49,08	49,07	49,35	0,47	0,96
		6,99	0,0014249	4906,45		49,06				
	2	6,99	0,0014237	4910,66	0,2	49,11	49,08			
		6,99	0,0014251	4905,69		49,06				
	3	6,99	0,0014005	4992,72	0,2	49,93	49,90			
		6,99	0,001402	4987,30		49,87				
CDWs+5CDWa (28 dias)	1	6,98	0,0016185	4313,01	0,2	43,13	43,10	43,96	0,76	1,73
		6,98	0,0016204	4307,83		43,08				
	2	6,98	0,0015697	4449,07	0,2	44,49	44,56			
		6,98	0,0015645	4463,60		44,64				
	3	6,98	0,001579	4422,17	0,2	44,22	44,21			
		6,98	0,0015799	4419,58		44,20				

Ref. ^a série	Número da amostra	Tensão (Volts)	Intensidade de corrente (A)	Resistência elétrica	l (m)	ρ (Ω.m)	ρ _{médio} (Ω.m)	ρ _{médio} - série(Ω.m)	Desvio(Ω.m)	CV (%)
CTL 1 (56 dias)	1	6,99	0,0013815	5060,80	0,2	50,61	52,55	50,90	1,58	3,11
		7,00	0,0012839	5449,02		54,49				
	2	6,99	0,001415	4939,79	0,2	49,40	49,39			
		6,99	0,0014153	4938,81		49,39				
	3	6,99	0,0013771	5077,26	0,2	50,77	50,76			
		6,99	0,0013777	5075,05		50,75				
CTL 2 (56 dias)	1	6,99	0,0014119	4950,78	0,2	49,51	49,50	49,68	0,20	0,41
		6,99	0,0014124	4948,88		49,49				
	2	6,99	0,0014009	4990,01	0,2	49,90	49,90			
		6,99	0,001401	4989,72		49,90				
	3	6,99	0,0014082	4963,85	0,2	49,64	49,64			
		6,99	0,0014079	4964,91		49,65				
CDWs (56 dias)	1	6,99	0,0014468	4831,84	0,2	48,32	48,29	46,50	1,57	3,38
		6,99	0,0014483	4826,76		48,27				
	2	6,99	0,0015379	4542,36	0,2	45,42	45,36			
		6,99	0,0015419	4530,25		45,30				
	3	6,99	0,0015224	4588,74	0,2	45,89	45,85			
		6,99	0,0015248	4581,45		45,81				
5CDWa (56 dias)	1	7,00	0,0012253	5713,95	0,2	57,14	57,04	56,27	0,67	1,19
		7,01	0,0012305	5693,62		56,94				
	2	7,00	0,0012541	5581,13	0,2	55,81	55,80			
		7,00	0,0012546	5578,91		55,79				
	3	7,00	0,0012501	5598,99	0,2	55,99	55,98			
		7,00	0,0012504	5597,73		55,98				
CDWs+5CDWa (56 dias)	1	6,99	0,0013632	5129,84	0,2	51,30	51,25	51,88	0,73	1,40
		6,99	0,0013659	5119,70		51,20				
	2	7,00	0,0013277	5268,66	0,2	52,69	52,68			
		7,00	0,0013281	5267,00		52,67				
	3	6,99	0,0013516	5174,31	0,2	51,74	51,73			
		6,99	0,0013524	5171,25		51,71				

Ref. ^a série	Número da amostra	Tensão (Volts)	Intensidade de corrente (A)	Resistência elétrica	l (m)	ρ (Ω.m)	ρ _{médio} (Ω.m)	ρ _{médio} - série(Ω.m)	Desvio(Ω.m)	CV (%)
CTL 1 (84 dias)	1	7,00	0,0012621	5545,04	0,2	55,45	55,41	55,09	1,09	1,98
		7,00	0,0012637	5537,86		55,38				
	2	7,00	0,0012976	5391,80	0,2	53,92	53,87			
		7,00	0,0013	5381,62		53,82				
	3	7,00	0,001249	5603,68	0,2	56,04	55,98			
		7,00	0,0012516	5591,88		55,92				
CTL 2 (84 dias)	1	7,00	0,0012635	5539,14	0,2	55,39	55,33	55,24	0,64	1,15
		7,00	0,0012663	5526,65		55,27				
	2	7,00	0,0012527	5587,13	0,2	55,87	55,83			
		7,00	0,0012547	5578,15		55,78				
	3	7,00	0,0012674	5521,70	0,2	55,22	54,56			
		7,00	0,001298	5391,22		53,91				
CDWs (84 dias)	1	6,99	0,0014322	4880,11	0,2	48,80	48,78	48,92	1,33	2,72
		6,99	0,0014334	4875,82		48,76				
	2	6,99	0,0014649	4769,88	0,2	47,70	47,67			
		6,99	0,0014669	4763,31		47,63				
	3	6,99	0,0013889	5033,70	0,2	50,34	50,32			
		6,99	0,00139	5029,78		50,30				
5CDWa (84 dias)	1	7,00	0,0011552	6062,85	0,2	60,63	60,59	60,69	0,32	0,52
		7,00	0,0011566	6055,33		60,55				
	2	7,00	0,0011577	6049,58	0,2	60,50	61,05			
		7,01	0,0011372	6159,95		61,60				
	3	7,00	0,0011579	6048,54	0,2	60,49	60,44			
		7,00	0,0011595	6040,02		60,40				
CDWs+5CDWa (84 dias)	1	7,00	0,0012589	5559,06	0,2	55,59	55,55	56,12	0,84	1,49
		7,00	0,0012609	5550,24		55,50				
	2	7,00	0,0012255	5711,95	0,2	57,12	57,08			
		7,00	0,0012271	5704,26		57,04				
	3	7,00	0,0012552	5575,53	0,2	55,76	55,73			
		7,00	0,0012563	5570,80		55,71				

Anexo 12

Coefficiente de difusão de cloretos e Resistividade associada aos 56 dias

Ref. ^a série	Número da amostra	ρ (Ω .m)	$\rho_{\text{médio}}$ (Ω .m)	Desvio	CV (%)	Temperatura média (°C)	Tensão (Volts)	xd (mm)	L (mm)	Dns ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Dns médio ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Desvio Padrão	CV (%)
CTL1	1	51,90	56,85	4,88	8,58	27,78	21,16	19,57	50,19	13,04	12,37	0,94	7,61
	2	61,65				26,88		17,78	50,17	11,71			
	3	56,99				27,33		0,00	50,22	0,00			
CTL2	1	50,70	50,93	1,76	3,46	27,32	20,54	20,71	49,66	14,13	14,85	0,67	4,52
	2	52,80				26,88		22,07	49,14	14,97			
	3	49,30				26,91		22,64	49,35	15,45			
CDWs	1	46,29	48,11	2,32	4,82	28,27	20,77	22,86	50,45	15,82	15,12	0,62	4,09
	2	50,72				28,09		21,21	50,65	14,63			
	3	47,32				27,91		21,64	50,58	14,93			
5CDWa	1	54,30	55,60	2,00	3,59	26,79	19,37	19,79	50,16	14,38	14,89	0,48	3,23
	2	57,90				26,84		21,00	50,11	15,33			
	3	54,60				26,90		20,50	50,30	14,98			
CDWa+5CDWa	1	52,67	51,39	1,43	2,78	27,70	20,29	24,29	49,52	16,98	17,34	0,38	2,21
	2	51,65				27,48		25,00	50,25	17,74			
	3	49,85				27,68		24,43	50,18	17,30			

Expansão devida ao ataque por Sulfatos

CTL1		Valores da Expansão (%)								
		Hidróxido de Cálcio				Sulfato de Sódio				
Tempo	Data	1	3	5	Média	2	4	6	Média	Expansão final
0	26/06/2019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	10/07/2019	-0,008	-0,009	-0,009	-0,009	-0,008	-0,008	-0,010	-0,008	0,000
4	24/07/2019	-0,009	-0,009	-0,009	-0,009	-0,006	-0,009	-0,007	-0,007	0,001
6	07/08/2019	-0,004	-0,005	-0,005	-0,004	0,002	0,005	0,003	0,003	0,008
8	21/08/2019	-0,011	-0,012	-0,011	-0,011	0,002	0,005	0,002	0,003	0,014
10	04/09/2019	-0,010	-0,010	-0,011	-0,010	0,000	0,003	0,000	0,001	0,012
12	18/09/2019	-0,006	-0,007	-0,007	-0,007	0,011	0,016	0,013	0,013	0,020
14	02/10/2019	-0,007	-0,010	-0,010	-0,009	0,010	0,016	0,012	0,013	0,021
16	16/10/2009	0,000	-0,003	-0,003	-0,002	0,021	0,029	0,024	0,025	0,027
18	30/10/2019	-0,002	-0,005	-0,005	-0,004	0,021	0,029	0,023	0,024	0,028
20	13/11/2019	0,002	0,000	0,000	0,001	0,034	0,042	0,034	0,037	0,036
22	27/11/2019	0,000	-0,003	-0,002	-0,002	0,038	0,049	0,039	0,042	0,044
24	11/12/2019	-0,004	-0,005	-0,003	-0,004	0,047	0,059	0,044	0,050	0,054
26	26/12/2019	-0,005	-0,004	-0,002	-0,004	0,053	0,070	0,051	0,058	0,062

CTL2		Valores da Expansão (%)									
		Hidróxido de Cálcio					Sulfato de Sódio				
Tempo	Data	1	3	5	Média		2	4	6	Média	Expansão final
0	03/07/2019	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	17/07/2019	-0,004	-0,005	-0,004	-0,004		0,003	0,001	-0,001	0,001	0,005
4	31/07/2019	-0,003	-0,003	-0,003	-0,003		0,008	0,008	0,005	0,007	0,010
6	14/08/2019	0,002	0,002	0,002	0,002		0,014	0,015	0,011	0,013	0,011
8	28/08/2019	-0,005	-0,006	-0,004	-0,005		0,013	0,014	0,008	0,012	0,017
10	11/09/2019	-0,005	-0,006	-0,005	-0,005		0,016	0,018	0,011	0,015	0,020
12	25/09/2019	-0,003	-0,004	-0,003	-0,003		0,021	0,024	0,017	0,021	0,024
14	09/10/2019	-0,006	-0,009	-0,007	-0,007		0,022	0,024	0,017	0,021	0,028
16	23/10/2019	0,000	-0,001	0,000	0,000		0,032	0,035	0,028	0,032	0,032
18	06/11/2019	0,003	0,002	0,003	0,002		0,044	0,048	0,039	0,043	0,041
20	20/11/2019	0,006	0,006	0,007	0,006		0,050	0,056	0,049	0,052	0,045
22	04/12/2019	0,003	0,005	0,004	0,004		0,058	0,065	0,060	0,061	0,057
24	18/12/2019	0,013	0,008	0,009	0,010		0,066	0,081	0,070	0,072	0,062
26	02/01/2020	0,009	0,005	0,007	0,007		0,079	0,101	0,096	0,092	0,085

CDWs		Valores da Expansão (%)									
		Hidróxido de Cálcio					Sulfato de Sódio				
Tempo	Data	1	3	5	Média		2	4	6	Média	Expansão final
0	10/07/2019	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	24/07/2019	-0,005	-0,006	-0,007	-0,006		0,006	0,006	0,004	0,005	0,012
4	07/08/2019	-0,001	-0,002	-0,003	-0,002		0,018	0,017	0,015	0,017	0,019
6	21/08/2019	-0,004	-0,004	-0,006	-0,004		0,026	0,026	0,023	0,025	0,030
8	04/09/2019	-0,009	-0,010	-0,012	-0,011		0,033	0,035	0,030	0,033	0,043
10	18/09/2019	-0,003	-0,003	-0,004	-0,003		0,054	0,059	0,054	0,055	0,058
12	02/10/2019	-0,005	-0,004	-0,007	-0,006		0,071	0,075	0,072	0,073	0,078
14	16/10/2019	-0,002	-0,004	-0,005	-0,003		0,105	0,110	0,107	0,108	0,111
16	30/10/2019	-0,009	-0,011	-0,012	-0,011		0,138	0,150	0,149	0,146	0,157
18	13/11/2019	0,003	0,002	0,000	0,001		0,191	0,205	0,203	0,200	0,198
20	27/11/2019	0,004	0,002	0,000	0,002		0,252	0,267	0,264	0,261	0,259
22	11/12/2019	-0,001	-0,001	-0,003	-0,001		0,324	0,351	0,349	0,342	0,343
24	23/12/2019	0,003	0,000	-0,001	0,001		0,427	0,470	0,468	0,455	0,454
26	06/01/2020	0,005	0,003	0,002	0,003		0,529	0,586	0,588	0,568	0,564

5CDWa		Valores da Expansão (%)									
		Hidróxido de Cálcio					Sulfato de Sódio				
Tempo	Data	1	3	5	Média		2	4	6	Média	Expansão final
0	03/07/2019	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	17/07/2019	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004		-0,003	-0,004	-0,005	-0,004	0,000
4	31/07/2019	-0,006	-0,006	-0,004	-0,005		0,002	0,002	0,000	0,001	0,007
6	14/08/2019	-0,002	-0,001	0,002	0,000		0,009	0,008	0,006	0,008	0,008
8	28/08/2019	-0,003	-0,002	0,000	-0,002		0,009	0,009	0,006	0,008	0,010
10	11/09/2019	-0,006	-0,005	-0,004	-0,005		0,008	0,008	0,005	0,007	0,012
12	25/09/2019	-0,003	-0,003	-0,001	-0,002		0,017	0,015	0,013	0,015	0,017
14	09/10/2019	-0,006	-0,006	-0,004	-0,005		0,016	0,014	0,011	0,014	0,019
16	23/10/2019	-0,001	0,002	0,003	0,001		0,031	0,031	0,027	0,030	0,028
18	06/11/2019	0,004	0,005	0,008	0,005		0,041	0,040	0,037	0,039	0,034
20	20/11/2019	0,004	0,008	0,010	0,007		0,053	0,051	0,051	0,052	0,044
22	04/12/2019	0,005	0,008	0,010	0,008		0,074	0,072	0,073	0,073	0,065
24	18/12/2019	0,000	0,003	0,004	0,002		0,088	0,084	0,090	0,087	0,085
26	02/01/2020	0,005	0,007	0,009	0,007		0,119	0,113	0,124	0,119	0,112

CDWs+5CDWa		Valores da Expansão (%)									
		Hidróxido de Cálcio					Sulfato de Sódio				
Tempo	Data	1	3	5	Média		2	4	6	Média	Expansão final
0	25/06/2019	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	09/07/2019	0,001	0,001	-0,001	0,000		0,007	0,008	0,008	0,008	0,007
4	23/07/2019	-0,006	-0,009	-0,009	-0,008		0,004	0,006	0,006	0,005	0,013
6	06/08/2019	-0,005	-0,008	-0,009	-0,008		0,017	0,022	0,021	0,020	0,028
8	20/08/2019	-0,001	-0,005	-0,006	-0,004		0,029	0,033	0,034	0,032	0,036
10	03/09/2019	-0,010	-0,014	-0,017	-0,013		0,035	0,038	0,034	0,035	0,049
12	17/09/2019	-0,002	-0,006	-0,009	-0,006		0,058	0,060	0,052	0,057	0,063
14	01/10/2019	-0,006	-0,010	-0,012	-0,009		0,075	0,075	0,066	0,072	0,082
16	15/10/2019	0,000	-0,006	-0,006	-0,004		0,105	0,104	0,093	0,101	0,105
18	29/10/2019	0,000	-0,005	-0,006	-0,004		0,127	0,126	0,118	0,124	0,128
20	12/11/2019	0,009	0,004	0,002	0,005		0,166	0,165	0,156	0,162	0,157
22	26/11/2019	0,004	-0,001	-0,002	0,000		0,188	0,191	0,180	0,186	0,186
24	10/12/2019	0,005	0,000	-0,003	0,001		0,235	0,234	0,224	0,231	0,230
26	26/12/2019	0,006	0,000	-0,002	0,001		0,285	0,286	0,276	0,282	0,281